

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Comparação dos métodos RC para o cálculo horário das
necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento
na EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Mariana Isabel Duarte Balsinha Rainho

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

2015

Resumo

Os edifícios constituem um dos setores que mais contribui para o consumo de energia. Todavia, existe ainda um vasto potencial para a adoção de medidas e implementação de soluções energéticas mais eficientes, levando à diminuição de consumos por parte deste setor. Visando atingir estas poupanças, são necessárias ferramentas de previsão do comportamento térmico de edifícios para estudar as necessidades energéticas de um determinado edifício face a diferentes soluções construtivas e energéticas, conduzindo à opção que assume um menor dispêndio de energia. O objeto de estudo da presente dissertação consiste em dois métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de base RC presentes nos documentos normativos EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1. Pretende-se estabelecer uma comparação entre os métodos, ambos aplicados numa base matricial, com as mesmas variáveis de entrada descritivas de uma habitação típica e do clima de Lisboa. Mais especificamente, esta dissertação visa a comparação das variáveis de saída em termos de temperaturas do ar interior e operativa em regime flutuante e necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento em regime termostático, a análise de sensibilidade das variáveis de entrada e ainda a identificação e discussão das principais diferenças dos modelos. O desempenho energético é determinado com base nas necessidades anuais nominais de energia útil, nomeadamente para aquecimento e arrefecimento, a fim de manter as condições nominais de temperatura. Como tal, é necessário definir determinados parâmetros, nomeadamente a localização e clima, e ainda características térmicas das soluções construtivas. No que diz respeito aos perfis de temperatura, em regime flutuante, obteve-se uma diferença entre valores médios de 0,6°C entre a proposta normativa ISO 52016-1 e a norma EN ISO 13790 no caso de estar a ser aplicado sombreamento e de 1,8°C para o caso deste não estar ativo. De seguida, de modo a ter um termo de comparação já validado procedeu-se à aplicação de um caso de estudo em que foi utilizada a ferramenta *Energy Plus*. As necessidades de energia calculadas pelo modelo da proposta normativa ISO 52016-1, no caso de arrefecimento diferem 0,5 kWh/m² e no caso de aquecimento diferem 4,3 kWh/m² dos resultados obtidos pela ferramenta *Energy Plus*. A norma EN ISO 13790 e os resultados obtidos *pelo Energy Plus* diferem, em termos de valores médios, 2,9 kWh/m² no caso do arrefecimento e 7,6 kWh/m² no caso do aquecimento. Em suma, conclui-se que para tipologias de edifícios pouco complexas a nível construtivo e cujo objetivo seja prever as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento os modelos matriciais de base RC demonstraram ser ferramentas adequadas para prever o comportamento térmico de um edifício simplificado a uma zona térmica.

Palavras-Chave: Método Horário; norma EN ISO 13790; proposta normativa ISO 52016-1; necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento

Abstract

Buildings are presented as one of the sectors that most contributes to energy consumption. However, there is still a vast potential for the adoption of measures and implementation of more efficient energy solutions, leading to lower consumption by this sector. In order to achieve these savings, predictive studies of the thermal behaviour of buildings are performed. These studies analyse the energy needs of a particular building regarding different construction and energy solutions, leading to the option that takes a lower expenditure of energy. The comparison of two methods of calculating the energy needs for heating and cooling of RC base present in the normative documents EN ISO 13790 and the proposed rule ISO 52016-1 allows us to analyse the differences between them, both of which are applied on a matrix basis, with the same descriptive input variables of a typical housing and climate of Lisbon. More specifically, this dissertation aims at comparing the output variables in terms of the interior and operative air temperature floating regime and energy needs for heating and cooling thermostat regime, the sensitivity analysis of the input variables and also the identification and discussion of the main differences between the models. The energy performance is determined based on the useful energy nominal annual needs, namely for heating and cooling, in order to maintain the nominal temperature conditions. As such, certain parameters need to be set, namely the location and climate, as well as thermal characteristics of the constructive solutions. Then, in order to have an already validated basis of comparison, the application of a case study was undertaken, in which the Energy Plus tool was used. Regarding inside air temperature profiles, in a free-float mode, the difference between regulatory proposal ISO 52016-1 and EN ISO 13790, in case of shading being applied is about 0,6°C and 1,8°C when the shading is not applied. In the case of cooling energy needs check up errors were associated, on average, taking the values of 0,5 kWh / m² between the results obtained by the regulatory proposal ISO 52016-1 and Energy Plus and 2,9 kWh/m² between EN ISO 13790 and Energy Plus. In respect of heating and 4,3 kWh / m² between ISO 52016-1 and Energy Plus and 7,6 kWh/m² between EN ISO 13790 and Energy Plus. In short, it has been concluded that, for less complex buildings in what concerns construction, and which study goals are not extremely accurate, matrix models of RC base have demonstrated the ability to predict the thermal behaviour of a building or thermal zone.

Keywords: Hourly Method; EN ISO 13790; draft international standard ISO 52016-1; heating and cooling energy needs;

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Agradecimentos	viii
Simbologia e Notações	ix
Capítulo 1 – Introdução	16
1.1 Enquadramento	16
1.2 Objetivos	18
1.3 Estrutura do Trabalho	19
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos	20
2.1 Norma EN ISO 13790	20
2.1.1 Descrição da Aplicação do Método Horário	20
2.2 Proposta Normativa ISO 52016-1	21
2.2.1 Descrição da Aplicação do Método Horário	22
2.3 Parâmetros Climáticos	22
2.3.1 Temperatura	25
2.3.2 Radiação	26
Capítulo 3 – Metodologia: Cálculo Dinâmico Simplificado	33
3.1 Método da Norma EN ISO 13790: Resolução Numérica	33
3.1.1 Definição de Variáveis	35
3.1.2 Cálculo de fluxos de calor a partir de fontes de calor internas e aproveitamento da radiação	41
3.1.3 Descrição do método matricial que permite a determinação das temperaturas do ar interior e operativa, e necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento necessária	42
3.1.4 Procedimento de cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento	47
3.2 Método da proposta normativa ISO 52016-1: Resolução Numérica	50
3.2.1 Definição das variáveis	50
3.2.2 Formulação subjacente ao método de cálculo para determinação das temperaturas do ar interior e operativa, e necessidades energéticas aquecimento e arrefecimento ..	56

3.2.3 Procedimento de cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento	60
Capítulo 4 – Caso de Estudo	62
4.1 Enquadramento	62
4.2 Definição das características do modelo de simulação	62
4.2.1 Geometria do edifício e materiais	62
4.2.2 Definição dos perfis de aquecimento e arrefecimento	64
4.2.3 Definição do perfil de ocupação do edifício	64
Capítulo 5 – Resultados	66
Capítulo 6 – Discussão	71
Capítulo 7 – Conclusões	74
Referências Bibliográficas	75
Anexos	77
Anexo A Valores do fator solar de vãos com proteção solar ativada a 100% e vidro incolor corrente (g_{\perp})	77

Índice de Figuras

Figura 1 – Dependência energética de Portugal e da Europa [14].....	17
Figura 2 - Consumo de energia final por setor de atividade Portugal em 2011 (adaptado)[1]	17
Figura 3 – Balanço térmico de um edifício.	23
Figura 4– Perdas energéticas de uma habitação [29].....	23
Figura 5 – Variação da temperatura exterior horária (azul) e temperatura média diária (verde) ao longo do ano para a região de Lisboa num ano meteorológico de referência.....	25
Figura 6 – Variação da radiação solar global horária numa superfície horizontal, num ano meteorológico de referência na região de Lisboa.....	26
Figura 7 – Comportamento da radiação solar na estação de verão e inverno.....	27
Figura 8 - Feixe de radiação incidente sobre uma superfície [24].....	30
Figura 9 - Esquema de transferência de calor através de uma envolvente opaca e de uma envolvente não opaca (adaptado) [13].....	32
Figura 10 – Rede RC modificada [12].....	34
Figura 11 - Circuito elétrico do modelo 5R1C do edifício ou zona [19].....	42
Figura 12 – Comportamento da temperatura no edifício em cinco situações diferentes [12]	47
Figura 13 – Esquema das condutâncias térmicas num elemento opaco	54
Figura 14 – Modelo de simulação utilizado no caso de estudo (adaptado) [6]	62
Figura 15 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de verão.....	67
Figura 16 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de inverno.....	67
Figura 17 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de verão.....	68
Figura 18 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de inverno.....	68
Figura 19 - Perfil das necessidades energéticas de arrefecimento para uma semana típica da estação de verão (1 a 8 de Agosto).....	69
Figura 20 - Perfil das necessidades energéticas de aquecimento para uma semana típica da estação de inverno (1 a 8 de Dezembro).....	70

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores de brilho e clareza de acordo com o INDEX [24].....	31
Tabela 2 - Valores padrão de Am de acordo com a classe de inércia térmica [12]	36
Tabela 3 – Valores para o fator de forma [12].....	38
Tabela 4 –Valores para diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu [12].....	38
Tabela 5 – Fatores relacionados com a transmissão de energia solar [12]	39
Tabela 6 – Valores típicos de transferência solar total para uma incidência perpendicular, tipos de envidraçados comuns [12]	39
Tabela 7 – Valores de resistência térmica de acordo com o fluxo de calor [16]	40
Tabela 8 – Coeficientes de absorção da radiação solar α , para superfícies exterior de um elemento opaco [25]	40
Tabela 9 – Atribuição dos índices das matrizes principais do modelo.....	45
Tabela 10 – Valores para o fator de forma [25].....	51
Tabela 11 – Valores para diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu [25].....	51
Tabela 12 – Capacidade de calor específica para o ar e mobiliário [25]	52
Tabela 13 – Valores aproximados para os coeficientes de transmissão térmica por convecção e radiação [22]	55
Tabela 14 – Dimensões dos elementos envidraçados do edifício [6].....	63
Tabela 15 – Descrição dos materiais que constituem o edifício, bem como os seus parâmetros térmicos [6].....	63
Tabela 16 – Horários semanais de controlo climático no interior do edifício para aquecimento e arrefecimento [6]	64
Tabela 17 – Perfil de Ocupação [6]	64
Tabela 18 – Taxas metabólicas adaptado [10].....	65
Tabela 19 - Comparação dos valores médios anuais entre os perfis de temperatura obtidos em regime flutuante	68
Tabela 20 – Número de horas média por dia fora de uma determinada temperatura de conforto, em regime flutuante	69
Tabela 21 – Comparação entre os resultados obtidos pela aplicação da norma EN ISO 13790, da proposta normativa ISO 52016-1 e os resultados do artigo	70
Tabela 22 - Valores correntes do fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar, ($g \perp$) [32].....	77

Agradecimentos

Os meus agradecimentos são direccionados a todos aqueles que estiveram mais diretamente relacionados com a realização desta dissertação.

Esta dissertação constitui um ponto de conclusão numa etapa muito importante da minha vida com altos e baixos, de anos de trabalho e realização pessoal.

Estou muito agradecida à minha orientadora, a Professora Doutora Marta Oliveira Panão pela oportunidade que me deu de poder desenvolver este trabalho. Queria agradecer a sua dedicação e paciência. Obrigada por todos os conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas assim como pelo seu exemplo de rigor e profissionalismo, pela fonte de inspiração traduzida na sua forma de trabalhar.

Às minhas amigas que estiveram presentes nesta fase, Ana Teresa, Carolina e Marta, expresso o meu profundo agradecimento pelo apoio e força transmitida, bem como pela partilha de frustrações.

À minha mãe por me ter proporcionado a possibilidade de tirar este curso e pelo sempre presente ombro amigo nos momentos mais difíceis e ao meu pai pela confiança nas minhas capacidades. À minha avó pela confiança e palavras amigas que sempre teve para comigo. Ao meu avô que infelizmente não conseguiu resistir para assistir a esta vitória mas que sempre acreditou em mim.

Obrigada por terem sempre acreditado que o culminar desta etapa seria possível, sem eles não teria sido possível chegar tão longe.

Simbologia e Notações

Acrónimos

5R1C	Cinco resistências e uma capacitância
ADENE	Agência para a Energia
CE	Comissão Europeia
EN	European Normative
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
UE	União Europeia
ECO.AP	Programa de eficiência energética para a Administração Pública
PN	Proposta Normativa

Nomenclatura

α	Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca
$\alpha_{sr;eli}$	Coeficiente de absorção de radiação solar do elemento da envolvente opaca <i>eli</i> ;
a_s	Ângulo de altura solar (°)
γ	Parâmetro adimensional da razão de balanço térmico
$f_{i,j}$	Coeficientes anisotrópicos para brilho e clareza (Perez Model)
β	Ângulo de inclinação da superfície inclinada (°)
θ_z	Distância angular do sol com a vertical (°)
t_s	Tempo solar, expresso em horas.
ω	Hora solar angular para a estação meteorológica em causa (°)
φ_w	Latitude em que a estação meteorológica está localizada
n_{day}	Número de contagem do dia do ano
δ	Declinação Solar (°)
λ	Latitude (°)
ω	Hora solar angular (°)

Λ_{at}	Razão adimensional entre a área das superfícies interiores e a área de pavimento, igual a 4.5
Δt	Intervalo de tempo
θ_{air}	Temperatura média do ar interior (°C)
θ_e	Temperatura do ar exterior (°C)
$\theta_{e,air;t}$	Temperatura do ar exterior no intervalo de tempo t (°C)
θ_i	Temperatura do ar interior (°C) = θ_{int}
$\theta_{i,0}$	Temperatura média do ar interior em condições de <i>free – float</i> (°C)
$\theta_{i,10}$	Temperatura média do ar interior correspondente a um fluxo de calor para aquecimento igual a 10 W/m ² (°C)
$\theta_{i,ac}$	Temperatura do ar interior no momento (°C)
$\theta_{i,C,set}$	Temperatura de referência do ar interior para a estação de arrefecimento (°C)
$\theta_{i,H,set}$	Temperatura de referência do ar interior para a estação de aquecimento (°C)
θ_m	Temperatura de massa (°C)
$\theta_{m,t}$	Temperatura de massa no final de serem percorridos todos os momentos de Δt de acordo com o método de <i>Crank-Nicolson</i> (°C)
$\theta_{m,t-1}$	Temperatura de massa no instante $t - 1$, ou seja, no início da iteração, de acordo com o método de <i>Crank-Nicolson</i> (°C)
θ_{op}	Temperatura operativa (°C)
θ_s	Média instantânea das temperaturas de todas as superfícies internas que tem contacto direto com o ar interno do edifício ou da zona climática (Temperatura – Estrela) (°C)
θ_{set}	Temperatura de referência (°C)
$\theta_{int;set;C}$	Temperatura nominal operativa interna para arrefecimento para a zona z_i , no tempo t (°C)
$\theta_{int;set;H}$	Temperatura nominal operativa interna para aquecimento para a zona z_i , no tempo t (°C)
θ_{sup}	Temperatura do ar de insuflação (°C)
$\theta_{sup;vei;zi;t}$	Temperatura do ar de insuflação do fluxo de ventilação entre o nó exterior e interior que entra na zona z_i , no tempo t (°C)
$\theta_{pli;eli;t}$	Temperatura no nó pli do elemento eli na zona z_i , no tempo t (°C)
$\theta_{pli+1;eli;t}$	Temperatura no nó $pli+1$ elemento eli na zona z_i , no tempo, t (°C)

$\theta_{pli-1;eli;t}$	Temperatura no nó <i>pli-1</i> do elemento <i>eli</i> na zona <i>zi</i> , no tempo, <i>t</i> (°C)
$\theta_{pli;eli;t-1}$	Temperatura no nó <i>pli</i> do elemento <i>eli</i> , na zona <i>zi</i> , no tempo <i>t-1</i> (°C)
$\theta_{int;a;zi;t}$	Temperatura do ar interior na zona em causa no intervalo de tempo dado, <i>t</i> , (°C)
$\theta_{int;a;zi;t-1}$	Temperatura do ar interior na zona em causa no passo de tempo anterior (<i>t-Δt</i>)
$\theta_{int;op;0}$	Temperatura operativa em condições de <i>free-float</i> para a zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (°C)
$\theta_{int;op;set}$	Temperatura nominal operativa interna necessária para a zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (°C)
$\theta_{int;op}$	Temperatura interna operacional na zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (°C)
$\theta_{int;op;upper}$	Temperatura operacional interna na zona <i>zi</i> na hora intervalo de tempo <i>t</i> obtido para o maior valor da potência de aquecimento (°C)
$\theta_{1;eli;t}$	Temperatura da superfície interna do elemento do edifício <i>eli</i> , na zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (°C)
$\phi_{C,max}$	Energia horária máxima para estação de arrefecimento (W/m ²)
$\phi_{C,nd}$	Energia horária necessária para a estação de arrefecimento (W/m ²)
$\phi_{H,max}$	Energia horária máxima para a estação de aquecimento (W/m ²)
$\phi_{H,nd}$	Energia horária necessária para a estação de aquecimento (W/m ²)
$\phi_{HC,nd}$	Energia horária necessária para aquecimento/arrefecimento (W/m ²)
$\phi_{H,nd,10}$	Energia de aquecimento correspondente ao fluxo de calor igual a 10 W/m ² (W/m ²)
$\phi_{H,nd,ac}$	Fluxo de calor no momento para suprir as necessidades de aquecimento (W/m ²)
$\phi_{HC;zi;t}$	Fluxo de potência de aquecimento (se positivo) ou de potência de arrefecimento (se negativa) na zona de cálculo <i>zi</i> , no intervalo de tempo <i>t</i> , dependendo da área de aplicação do cálculo (W)
ϕ_{HC}	Fluxo potência de aquecimento (se positivo) ou potência de arrefecimento (se negativo) na zona considerada <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (W)
$\phi_{HC;upper}$	Maior valor da potência de aquecimento para a zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (W)
ϕ_{int}	Fluxo de calor devido a fontes de calor interno (W/m ²)
$\phi_{int;zi;t}$	Fluxo de calor devido a fontes de calor interno na zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (W)

$\phi_{int,oc}$	Fluxo de calor específico devido à taxa metabólica da atividade dos ocupantes (W/m ²);
$\phi_{int,A}$	Fluxo de calor interno específico devido ao calor dissipado por aparelhos (W/m ²);
$\phi_{int,L}$	Fluxo de calor interno específico devido aos sistemas de iluminação (W/m ²);
$\phi_{int,WA}$	Fluxo de calor interno específico devido à recuperação de perdas de água quente e águas quentes sanitárias (W/m ²);
$\phi_{int,HVAC}$	Fluxo de calor interno específico devido à recuperação de aquecimento, arrefecimento ou sistemas de ventilação (W/m ²);
$\phi_{int,Proc}$	Fluxo de calor interno específico devido a perdas recuperáveis de processos (W/m ²);
ϕ_m	Ganho térmico por unidade de tempo à entrada do nó θ_m (W/m ²)
$\phi_{m,tot}$	Ganho térmico total por unidade de tempo à entrada do nó θ_m (W/m ²)
ϕ_s	Ganho térmico por unidade de tempo à entrada do nó θ_s (W/m ²)
ϕ_{sol}	Fluxo de calor devido a fontes de aproveitamento da radiação solar (W/m ²)
$\phi_{sol;zi;t}$	Transmissão solar direta, somada ao longo de todas as janelas w_i , na zona z_i , no tempo t (W)
$\phi_{sky;eli}$	Fluxo de radiação térmica perdida para o céu, do elemento eli (W/m ²)
ψ_j	Coefficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j (W/m ²)
ψ_{ref}	Coefficiente de transmissão térmica linear de referência (W/m ²)
$\psi_{ki;zi}$	Coefficiente de transmissão térmica linear k_i , na zona z_i (W);
A_{eli}	Área do elemento de construção, eli , na zona z_i (m ²)
A_{elk}	Área do elemento de construção, elk , in zone z_i (m ²)
A_f	Área útil de pavimento do edifício (m ²)
A_j	Área de contato com o volume interior dos elementos j (m ²)
A_m	Área de massa efetiva (m ²)
A_{op}	Área opaca relativa à superfície da envolvente exterior (m ²)
A_r	Área útil de cobertura do edifício (m ²)
A_{sol}	Área efetiva coletora de radiação solar de uma qualquer superfície opaca ou translúcida (m ²)

A_{tot}	Área total dos elementos construtivo $elk = 1, \dots, eln$ em contacto com o volume de ar interior (m^2)
A_T	Área total das superfícies em contacto com o volume de ar interior (m^2)
A_{zs}	Azimute solar
b_{tr}	Coefficiente de redução de perdas de um determinado espaço não útil ou de um edifício adjacente
C_m	Capacitância térmica do edifício considerado (J/K)
$C_{int;zi}$	Capacidade térmica mássica da zona zi (J/K)
$f_{int,c}$	Fração convectiva dos ganhos internos
$f_{sol,c}$	Fração convectiva da radiação solar
$f_{H/C,c}$	Fração convectiva do sistema de aquecimento/arrefecimento
F_F	Relação entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado (fator de forma)
F_g	Fração envidraçada do vão envidraçado
$F_{sh,k}$	Fator de sombreamento de elementos exteriores que causam obstrução da área com exposição solar direta e difusa
$F_{sh,g}$	Fator de redução de sombreamento para dispositivos móveis
$F_{sh;ob;eli;t}$	Fator de redução de sombreamento para os obstáculos externos do elemento eli , no tempo t calculada para todos os tipos de construção de elementos do envelope
$G_{s;b}$	Feixe de radiação solar direta medido.
$G_{s;d}$	Radiação horizontal medida (W/m^2)
$G_{s;c}$	Constante solar definida como $1370 W/m^2$
$g_{\perp vi}$	Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão
h_{is}	Coefficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e de estrela ($W/m^2.K$)
h_{ms}	Coefficiente de transferência de calor entre as temperaturas de massa e de estrela ($W/m^2.K$)
$h_{ci;eli}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção interno do elemento de construção, eli , na zona, zi ($W/m^2.K$)
$h_{ce;eli}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção no exterior do elemento de construção eli , na zona zi ($W/m^2.K$)
$h_{pli;eli}$	Condutância entre o nó pli e o nó $pli + 1$ do elemento eli ($W/m^2.K$)
$h_{pli-1;eli}$	Condutância entre os nós $pli-1$ e pli do elemento, eli ($W/m^2.K$)

$h_{re;eli}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação no exterior da superfície do elemento de construção <i>eli</i> (W/m ² .K)
$h_{ri;eli}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação no interior da superfície do elemento de construção <i>eli</i> (W/m ² .K);
H_{ext}	Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contato com o exterior (W/K)
H_{ht}	Coeficiente global de transferência de calor (W/K)
H_{tr}	Coeficiente global de transferência de calor por transmissão (W/K)
$H_{tr,1}$	Coeficiente de transferência de calor para a ligação em série das condutâncias H_{ve} e $H_{tr,is}$ (W/m ² K)
$H_{tr,2}$	Coeficiente de transferência de calor para a ligação em série das condutâncias $H_{tr,1}$ e $H_{tr,w}$ (W/m ² K)
$H_{tr,3}$	Coeficiente de transferência de calor para a ligação em série das condutâncias $H_{tr,2}$ e $H_{tr,w}$ (W/m ² K)
$H_{tr,em}$	Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas exterior e de massa (W/K)
$H_{tr,is}$	Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e de estrela (W/K)
$H_{tr,ms}$	Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas de massa e de estrela (W/K)
$H_{tr,op}$	Coeficiente de transferência de calor por transmissão através dos elementos opacos (W/K)
$H_{tr,w}$	Coeficiente de transferência de calor por transmissão através dos vãos envidraçados (W/K)
H_{ve}	Coeficiente de transferência de calor por ventilação (W/K)
$H_{ve;vei;zi;t}$	Coeficiente de transmissão de calor por ventilação entre o nó exterior e interior, na zona <i>zi</i> , no tempo <i>t</i> (W/K);
$I_{sol,j}$	Radiação solar incidente numa superfície <i>k</i> com uma dada orientação <i>j</i> (W/m ²)
$I_{sol;dir;eli;t}$	Radiação solar direta incidente no elemento <i>eli</i> (W/m ²)
$I_{sol;dif;eli;t}$	Radiação solar difusa no elemento <i>eli</i> (W/m ²)
I_{ext}	Radiação extra-terrestre (W/m ²)
I_{dir}	Radiação solar direta da superfície inclinada (W/m ²)
Ind	INDEX
$\kappa_{pli;eli}$	Capacidade de calor específico do nó <i>pli</i> do elemento opaco <i>eli</i> (J/m ² .K)

$l_{ki,zi}$	Comprimento da ponte térmica linear ki na zona zi (m)
m	Massa de ar
$Q_{C,ht}$	Ganhos devido a transferência de calor por transmissão e ventilação do edifício para arrefecimento (J)
$Q_{HC,nd}$	Necessidades de energia para aquecimento e /ou arrefecimento (Wh/m ²)
Q_{int}	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor (kWh)
$Q_{int,ref}$	Ganhos térmicos internos de referência associados a fontes internas de calor (kWh)
Q_{nd}	Necessidades de energia (kWh)
Q_{sol}	Ganhos térmicos resultantes do aproveitamento da radiação solar (kWh)
$Q_{sol,ref}$	Ganhos térmicos de referência resultantes do aproveitamento da radiação solar (kWh)
Q_{ve}	Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento (kWh)
R_{ph}	Taxa de renovação de ar interior (renovações por hora) (h ⁻¹)
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior (m ² K/W)

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Enquadramento

A energia constitui um elemento essencial em todas as economias, constituindo deste modo um *input* básico [1] em praticamente todos os processos produtivos e um fator importante no consumo final das famílias. A sociedade atual tem como base de sustentação o uso cada vez maior de energia, uma vez que a sua demanda é na utilização de energia para produção de bens e serviços. Segundo este pressuposto, todo o desenvolvimento seja ele económico ou social, é baseado na disponibilidade de energia e no seu abastecimento. A relação entre o seu consumo e o desenvolvimento económico provocou, a partir dos anos 40 (tendo sido mais acentuado no período pós II Guerra Mundial), um aumento exacerbado de consumo de energia, diretamente relacionado com o aumento da população e o PIB de cada país. Agregado a este aumento do consumo de energia, aumento da produção de bens e a existência de um maior leque de serviços entramos na era do consumo e por conseguinte uma demanda cada vez maior de recursos energéticos finitos. [9]

A utilização dos recursos naturais de forma desmesurada sem a preocupação com as consequências negativas fez com que o meio ambiente se tenha degradado, principalmente nas cidades onde os níveis de poluição do ar e das águas bem como a degradação dos solos, têm sido devastadores. Estas problemáticas começaram a ter um papel cada vez mais importantes e na década de 70 começaram a tomar lugar discussões mundiais relativamente ao equilíbrio ecológico no planeta assim como aos efeitos negativos causados pelas atividades desenvolvidas pelo homem. Como tal, é urgente investir no uso de novas tecnologias, nomeadamente as energias renováveis, em medidas de educação ambiental e promover a eficiência energética de modo a que se possa garantir a conservação de energia. Num mundo intensamente globalizado, podemos assistir a cenários em que a dependência energética exterior pode influenciar negativamente e num curto período de tempo qualquer economia, sendo que aos governos de cada país aplicar e desenvolver medidas e atitudes que visem a mudança deste paradigma. Existem exemplos específicos de alguns países que importam energia como forma de matéria primária para a produção de energia final que será posteriormente exportada, o que constitui o caso da indústria de refinação de petróleo. Em síntese, a transformação de fontes de energia primária em energia para consumo final depende de condições estruturais, escolhas tecnológicas e políticas nacionais.

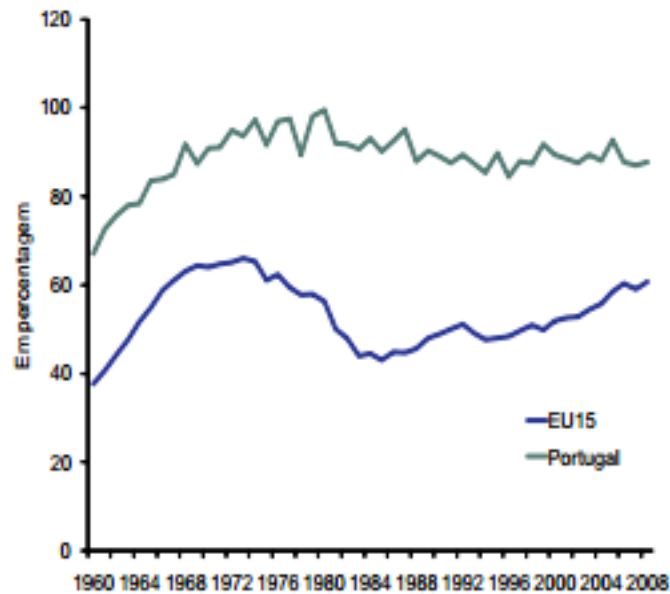


Figura 1 – Dependência energética de Portugal e da Europa [14].

De acordo com estudos desenvolvidos pela Agência Internacional de Energia no ano de 2010, é previsto que, para o ano de 2035, a produção mundial de energia elétrica tenha um crescimento de 87% relativamente a 2007, a par com 49% para o crescimento do consumo total de energia primária. O incremento do consumo total de energia atribui uma componente significativa aos combustíveis fósseis, apesar dos esforços na procura de fontes alternativas. A mesma agência prevê que as energias renováveis representarão, em 2035, cerca de um terço da produção total de eletricidade. A utilização destas fontes aumentará a um ritmo rápido devido aos baixos custos da tecnologia, ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis e do carbono mas sobretudo devido aos subsídios que continuam a ser concedidos [18] .

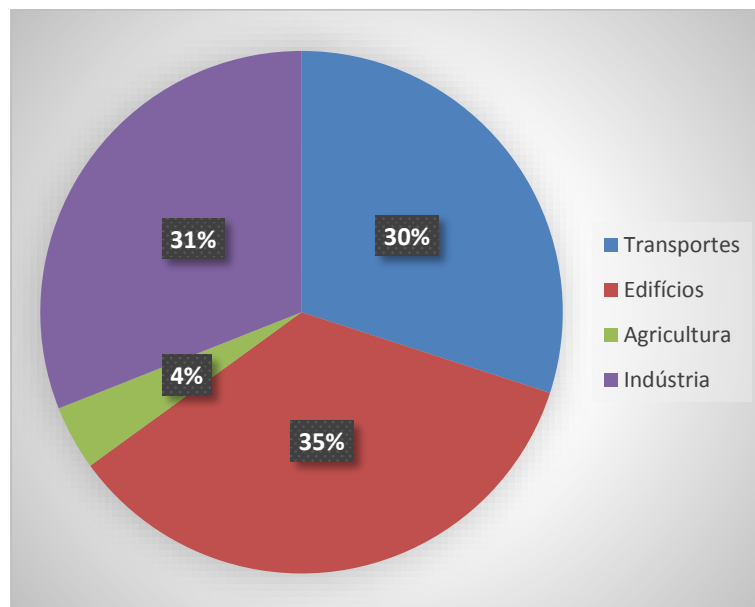


Figura 2 - Consumo de energia final por setor de atividade Portugal em 2011 (adaptado) [1]

Como principais consumidores de energia, sob a forma de eletricidade ou calor, destacam-se os setores de transportes, indústria e de edifícios (residências e serviços), sendo

que cada um contribui respetivamente com cerca de 30%, 31% e 35% para o consumo de energia final global, tal como pode ser verificado pela análise da Figura 2.

No que diz respeito à utilização final de energia nos edifícios residenciais, este distribui-se aproximadamente da seguinte forma: cozinha 39,1%, águas quentes sanitárias 23,5%, aquecimento do ambiente 21,5%, equipamentos elétricos 10,9%, iluminação 4,5% e arrefecimento do ambiente 0,5% [11]. Pelo que, falando em termos do ponto de vista da eficiência energética, seja urgente integrar os princípios de racionalização de energia nos edifícios novos e nos que necessitam intervenções de requalificação, evitando que o consumo de energia aumente drasticamente. Algumas intervenções eficazes em edifícios podem conduzir a poupanças de 30-35% no consumo final de energia. Em 2013, a DGEG elaborou o Balanço Energético Sintético para o período de 2005 a 2013. Neste estudo conclui-se que Portugal reduziu as suas importações energéticas em cerca de 18% e exportou mais do dobro da energia produzida, relativamente ao ano de 2005. Neste estudo verificou-se ainda que o consumo de energia primária decresceu cerca de 20% e no que diz respeito à dependência energética por parte do exterior esta apresentou uma redução de 17%, tal como pode ser verificado pela análise da Figura 1. É de salientar o facto da energia produzida através de fontes renováveis endógenas em 2013 ter atingido o recorde contribuindo com cerca de 60% da energia elétrica produzida em Portugal. [3]

Como tal, e tendo em conta o panorama apresentado no que diz respeito ao consumo por parte dos edifícios, os compromissos da EU no âmbito do Protocolo de Quioto, surge a necessidade da criação de uma Diretiva (Diretiva nº 2002/91/CE [8]) do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios, com o objetivo de promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios tendo em conta as condições climáticas externas e as condições locais, e que posteriormente foi atualizada para a Diretiva nº 2010/31/EU [28]. É neste contexto que surge a Norma EN ISO 13790 em que o cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento e arrefecimento de um edifício, ao longo de um ano, se baseia na metodologia descrita na Norma EN ISO 13790 que, em parte, foi adotada na Regulamentação Térmica em Portugal pelos Decretos-Lei n.º80/2006 e 118/2013. E mais recentemente a proposta normativa ISO 52016-1 em que esta norma internacional faz parte de uma série de padrões cujo objetivo visa a harmonização internacional das metodologias de avaliação das performances energéticas em edifícios, denominada “conjunto de padrões EPB”.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo a comparação de dois métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de base RC descritas nos documentos normativos EN ISO 13790 [12] e na proposta normativa ISO 52016-1 [25]. Os dois métodos são aplicados numa base matricial e têm as mesmas variáveis de entradas descritivas de uma habitação típica e do clima de Lisboa. Mais especificamente, esta dissertação visa a comparação das variáveis de saída: i) regime flutuante, a temperatura do ar interior no interior da zona térmica e a temperatura operativa; ii) em regime termostático, as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. Avalia-se ainda a sensibilidade das variáveis de entrada do modelo nos resultados finais e discutem-se as principais diferenças entre os modelos.

Os dois métodos descritos na norma EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1, que pretende substituir a primeira, são utilizadas para calcular as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de uma zona térmica com uma base de tempo horário. Para este estudo foi desenvolvido um *script* para o programa Matlab para cada uma das metodologias de cálculo.

De modo a ter um termo comparação entre os métodos aplicados, é feita a aplicação de um caso de estudo [6], cujos resultados foram obtidos pela ferramenta *Energy Plus* e com os quais é feita uma comparação com os resultados obtidos pela aplicação dos dois métodos.

Assim sendo, esta dissertação pretende comprovar a similaridade de resultados obtidos pela aplicação da Norma EN ISO 13790 e pela proposta normativa ISO 52016-1, bem como com os resultados obtidos pelo *Energy Plus* no caso de estudo. Uma vez que a proposta normativa vem substituir a norma EN ISO 13790.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação é composta por 6 capítulos, sendo que o presente capítulo corresponde à introdução. O conteúdo e organização dos restantes capítulos resume-se de seguida:

O Capítulo 1 constitui a Introdução, onde é desenvolvido um enquadramento do trabalho, bem como os seus objetivos e estrutura.

No Capítulo 2 é desenvolvida uma abordagem teórica aos métodos em aplicação e são definidos parâmetros climáticos como a temperatura do ar e a radiação solar nas várias orientações que influenciam as condições de conforto térmico do edifício. Será feita uma breve descrição dos modelos simplificados para a Norma EN ISO 13790 e para a proposta normativa ISO 52016-1

Seguidamente no Capítulo 3, que define a metodologia de trabalho, são descritos os dois procedimentos de cálculo que permitem calcular as necessidades nominais de energia para aquecimento e arrefecimento bem como a temperatura do ar interior e operativa em regime flutuante, recorrendo ao modelo 5R1C descrito na norma EN ISO 13790 e à metodologia apresentada na proposta normativa ISO DIS 52016-1, incluindo as equações e definição das variáveis comuns a ambos os métodos.

Posteriormente, no Capítulo 4, aplicam-se os dois métodos a um caso de estudo de uma habitação típica no clima de Lisboa, pelo que são aí apresentadas as suas características físicas e térmicas, bem como os seus perfis de utilização, aquecimento e arrefecimento.

No Capítulo 5 apresentam-se as das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de acordo com a aplicação de ambas as normas, bem como para os valores de temperatura do ar interior e operativa.

No capítulo 6 é feita a discussão dos resultados obtidos por ambos os métodos, bem como pelos resultados provenientes do caso de estudo.

Finalmente, no capítulo 7, são retiradas as principais conclusões desta dissertação e é ainda feita uma abordagem às limitações dos métodos utilizados.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

2.1 Norma EN ISO 13790

O cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento e arrefecimento de um edifício, ao longo de um ano, baseia-se na metodologia descrita na Norma EN ISO 13790 que, em parte, foi adotada na Regulamentação Térmica em Portugal pelos Decretos-Lei n.º80/2006 e 118/2013. Os procedimentos de cálculo dependem do tipo de método escolhido, quer seja um método sazonal, mensal ou horário, e que se distinguem da simulação dinâmica. A comparabilidade dos resultados obtidos por cada um dos métodos requer que os pressupostos utilizados sejam os mesmos para cada método, nomeadamente a definição dos parâmetros físicos e a utilização do edifício. Relativamente aos métodos referidos, esses podem ser divididos em dois grupos:

- Métodos quase-estacionários, que fazem recurso a um balanço de energia durante um período de tempo longo, como por exemplo um mês ou uma estação inteira, onde se incluem os métodos sazonais e mensais;
- Métodos dinâmicos, que fazem recurso a um balanço de energia em pequenos períodos de tempo, geralmente numa base de tempo horária, tendo em conta a energia armazenada nos elementos de armazenamento térmico, onde se incluem o cálculo dinâmico simplificado e a simulação dinâmica.

2.1.1 Descrição da Aplicação do Método Horário

O modelo é uma abordagem simplificada, comparativamente à simulação dinâmica, embora se pretenda [12]:

- Mesmo nível de transparência, reprodutibilidade, e robustez;
- Especificação clara, através de um conjunto limitado de equações, permitindo a rastreabilidade do processo de cálculo;
- Minimização dos dados de entrada;
- Procedimentos de cálculo inequívocos;
- Com maior vantagem face ao método mensal pois permite a definição de perfis de utilização com base de tempo horária.

Além dos fatores já mencionados, o modelo permite:

- Novos desenvolvimentos com base na modelação física RC de outros elementos;

O modelo faz a distinção entre a temperatura do ar interior e a temperatura média das superfícies internas. Este facto faz com que possa ser usado, em teoria, para um controlo do conforto térmico e aumenta a acuidade uma vez que tem em conta as frações convectiva e radiativa dos ganhos solares, de iluminação e internos.

As necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento obtém-se através do cálculo para cada hora da potência de aquecimento e de arrefecimento $\phi_{HC,nd}$, expressa em W, positiva

para aquecimento e negativa para arrefecimento, que necessita de ser fornecido ou extraído do nó de ar interno (θ_{air}) de modo a manter um *set-point* de temperatura mínimo ou máximo. O *set-point* de temperatura é uma média ponderada da temperatura do ar e da temperatura média radiante.

2.2 Proposta Normativa ISO 52016-1

Esta norma internacional faz parte de uma série de padrões cujo objetivo visa a harmonização internacional das metodologias de avaliação do desempenho energético em edifícios, denominada “conjunto de padrões EPB”.

A proposta normativa ISO 52016-1 consiste em duas partes sob o título de Desempenho Energético em Edifícios – Cálculo das Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, temperaturas internas e carga de aquecimento e arrefecimento num edifício ou zona”:

- Parte 1: Procedimentos de Cálculo;
- Parte 2: Explicação e justificação da proposta normativa ISO 52016-1.

Esta norma internacional apresenta um conjunto de métodos de cálculo coerentes em diferentes níveis de detalhe para as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento de um edifício e/ou as temperaturas internas e /ou as cargas de aquecimento e arrefecimento, incluindo a influência sistemas de edifícios técnicos, aspetos de controlo e condições fronteira, quando relevantes para os cálculos.

A proposta normativa ISO 52016-1 cancela e substitui a ISO 13790 anteriormente publicada em 2008. Assim sendo, as principais diferenças comparativamente à ISO 13790 são:

- Integração no conjunto das normas EPB, conforme especificado no padrão global EPB (EN 15603). Incluindo a eliminação de elementos de cálculo já incluídos ou que serão incluídos por outras normas;
- Revisão do método mensal e eliminação do método sazonal.
- Substituição do método horário de cálculo simplificado por um outro método de base RC, mais direto e transparente, sem necessidade de recorrer a novos dados de *input*.

Esta norma internacional consiste em métodos de cálculo para a avaliação de:

- a) Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, baseado no método horário ou mensal;
- b) A temperatura interna, baseado em cálculos do método horário;
- c) A carga de aquecimento e arrefecimento, baseado em cálculos do método horário.

2.2.1 Descrição da Aplicação do Método Horário

A principal característica do método horário é considerar a influência das alterações horárias e diárias ao nível do clima, de operação (nomeadamente no que diz respeito à utilização de persianas, termostatos, necessidades, ocupação, acumulação, etc.) bem como a sua interação dinâmica para aquecimento e arrefecimento. No método de cálculo horário descrito nesta norma, cada elemento de construção é modelado separadamente, o que leva a uma maior transparência nas condições fronteira de cada elemento. Este método possibilita a quantificação de dados mensais por integração temporal, essenciais para uma rápida compreensão dos principais processos envolvidos e permite obter fatores de correção de ajuste para o método mensal, quando o aquecimento e o arrefecimento são feitos de forma intermitente. Para o cálculo horário da temperatura interior, das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento e o cálculo das respetivas cargas é utilizada sempre a mesma metodologia, pelo que os valores de *input* são os mesmos ainda que possam existir premissas de cálculo diferentes.

2.3 Parâmetros Climáticos

As condições de conforto existentes numa habitação dependem de um conjunto de fatores que incluem as características de construção do edifício bem como dos sistemas de aquecimento e arrefecimento utilizados. Estes fatores estão também relacionados de forma direta com os custos de operação do edifício. Assim, é essencial proceder a uma avaliação correta destas características para avaliar as linhas de ação que podem conduzir a uma melhoria significativa do ambiente interior da habitação e menores custos na utilização de energia, pelo que, a avaliação das características de construção [26] e dos sistemas de aquecimento e arrefecimento é especialmente importante. As características arquitetónicas e construtivas dos edifícios têm também uma influência determinante nas condições de conforto interior. Um edifício que tenha sido projetado e construído sem ter em conta as condições climáticas do local, dificilmente poderá ser considerado um edifício eficiente na utilização de energia e proporcionar conforto aos seus [5] moradores.

Com o intuito de obter um ambiente interior dos edifícios termicamente confortável para os seus ocupantes, as normas sobre conforto térmico são uma ferramenta essencial. Inicialmente estas normas tinham como principal preocupação definir as condições de conforto térmico, sem ter em conta os consumos energéticos necessários para atingir o conforto. Mas devido aos problemas ambientais que são cada vez mais evidentes e à necessidade de desenvolvimento sustentável, estas normas de conforto térmico têm de considerar formas de o atingir com o menor consumo energético possível [4]

Por outro lado, o aumento na Europa da utilização de equipamentos para arrefecimento ambiente é preocupante, em termos ambientais, devido ao potencial aumento do consumo energético, contribuindo para o excesso das emissões de CO₂ e o consequente aquecimento global. Assim, até a energia ser suprida por fontes renováveis, a climatização de espaços deverá ser reservada para as necessidades especiais de climas extremos, e não para melhorar os efeitos de um fraco *design* climático dos edifícios. A solução é um bom *design* climático, utilizando dados realísticos de conforto térmico [4] .

A norma internacional sobre conforto térmico EN ISO 7730 utiliza o modelo de Fanger [27] e introduz alguns conceitos adicionais e simplificações necessárias para uma

utilização prática. De forma a simplificar os resultados definem-se diferentes categorias de conforto térmico para diferentes utilizações que se designam por classes de conforto térmico. Estas classes baseiam-se (no caso da classe A) no cumprimento de condições interiores que garantam valores de absolutos de PMV inferiores a 0.5. De acordo com o modelo de Fanger existe conforto térmico sempre que existe equilíbrio térmico e os mecanismos de termo-regulação estão em atividade reduzida e não existem condições de desconforto local devido a correntes de ar, assimetria radiativa, elevado gradiente de temperatura, na vertical e temperatura do pavimento.

Os valores de temperatura e de humidade relativa que nos transmitem a sensação de conforto térmico em espaços interiores são variáveis por estarem relacionados com a temperatura média no exterior. Na grande parte dos climas associados aos países europeus as amplitudes térmicas vão para além dos limites de tolerância da população, resultando na necessidade de nos protegermos do clima (e das intempéries) para conseguirmos sobreviver.

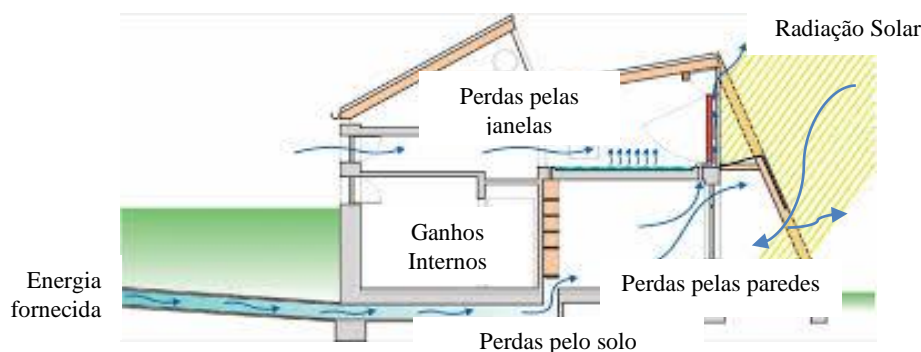


Figura 3 – Balanço térmico de um edifício.

A utilização da energia de uma forma natural e racional como método de projetar edifícios, do ponto de vista do conforto, inclui aspetos relacionados com o ambiente térmicos e a qualidade de ar interior e portanto com a ventilação.

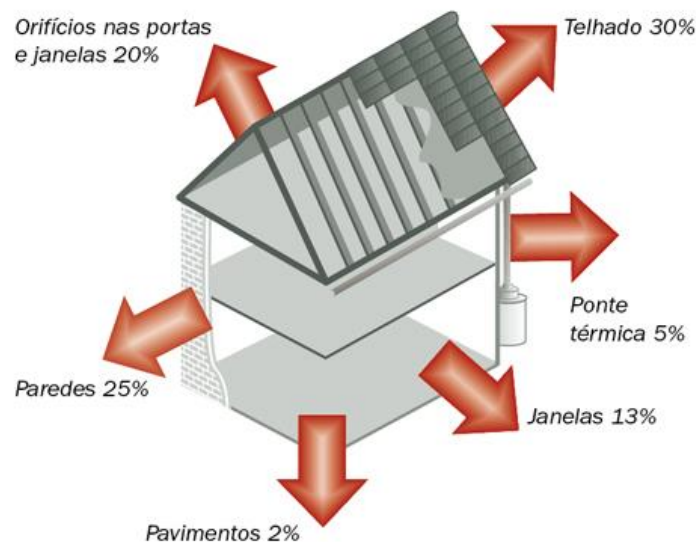


Figura 4– Perdas energéticas de uma habitação [29].

A Figura 3 e a Figura 4 mostram, respetivamente, o balanço energético e as diversas formas de perdas energéticas numa habitação e as percentagens associadas a cada uma destas perdas.

Devido à variação de fatores naturais, nomeadamente a direção e a velocidade do vento e a flutuação da temperatura, os sistemas de ventilação natural nem sempre permitem assegurar as taxas de renovação horária ideais. Assim sendo a renovação de ar interior [30] revela-se ser de extrema importância para manter a qualidade do ar interior, bem como para o conforto térmico o que facilita a dissipação de calor e a diluição de vapor de água, poeiras, gases poluentes entre outros. A qualidade do ar interior pode ser garantida através de mecanismos de meios mecânicos ou através de ventilação natural.

As variáveis que mais influenciam os edifícios, relativamente à transferência de calor, são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar é a variável que induz as trocas de calor através da envolvente do edifício, sendo determinante no estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior. Estes fluxos ocorrem fundamentalmente no inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas, enquanto no verão o sentido do fluxo inverte-se e por conseguinte verifica-se uma situação de ganhos térmicos. Assim sendo, a redução destas perdas e ganhos respetivamente no período de inverno e verão torna-se uma necessidade fulcral modo a melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios. Tipicamente as medidas adotadas resultam na utilização de soluções de isolamento térmico nos elementos opacos (paredes, cobertura e pavimentos) e/ou a utilização de vidros duplos nos vãos envidraçados. Por outro lado, os ganhos térmicos por transferência de calor, em que o fluxo de transferência de calor tem o sentido do exterior para o interior, podem ser penalizadores para o edifício devido a um aumento da carga térmica e, consequentemente, da sua temperatura interna.

A outra variável climática de extrema importância para os edifícios é a radiação solar pois pode ser determinante no estabelecimento das condições de conforto térmico. Na período de inverno, a radiação solar contribui para o aumento da temperatura no interior da habitação, ao passo que no período de Verão constitui uma fonte de calor a evitar.

Na presente dissertação foram utilizados dados climáticos para a região de Lisboa extraídos do portal do LNEG [17]. O LNEG providencia dados climáticos para o SCE - Sistema Nacional de Certificação de Edifícios para as regiões NUTS III de Portugal. Com a aplicação «CLIMAS-SCE» selecionou-se o município em questão, Lisboa, de modo a obter as estatísticas climatológicas e o ano meteorológico de referência com base de tempo horária que está na base da simulação dinâmica de sistemas e edifícios. Os dados são corrigidos pela altitude do local.

2.3.1 Temperatura

As trocas de calor através da envolvente do edifício devem-se principalmente às condições climáticas exteriores. A temperatura do ar exterior dependente da localização do edifício, variando ao longo do dia, de dia para dia, e ao longo do ano. O Instituto Português do Mar e da Atmosfera tem uma cobertura apreciável deste parâmetro, disponibilizando valores médios mensais - obtidos a partir de períodos de observação de 30 anos – correspondentes a temperaturas médias, máximas e mínimas diárias.

Para o apuramento das necessidades nominais de energia, a temperatura do ar no interior dos edifícios deverá corresponder às condições de conforto térmico estabelecidas pelos ocupantes, ou seja, a temperatura interior de conforto. Esta deve apresentar um valor que permita aos ocupantes realizar as suas atividades com condições de conforto. Devido ao facto da temperatura de conforto estar associada à utilização que é dada ao edifício, a regulamentação adota valores de referência, o que possibilita a comparação de frações de habitação entre si. A diferença entre as duas temperaturas interiores, a que resulta do balanço de energia e a de conforto, conduz a que existam necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento do espaço ocupado, consoante a temperatura de conforto supera a primeira ou vice-versa. Por sua vez, a diferença de temperatura entre o ar interior e o exterior conduz a fluxos de calor entre estes dois meios. Em países de clima temperado, no qual Portugal se insere, as estações de aquecimento e de arrefecimento encontram-se bem diferenciadas.

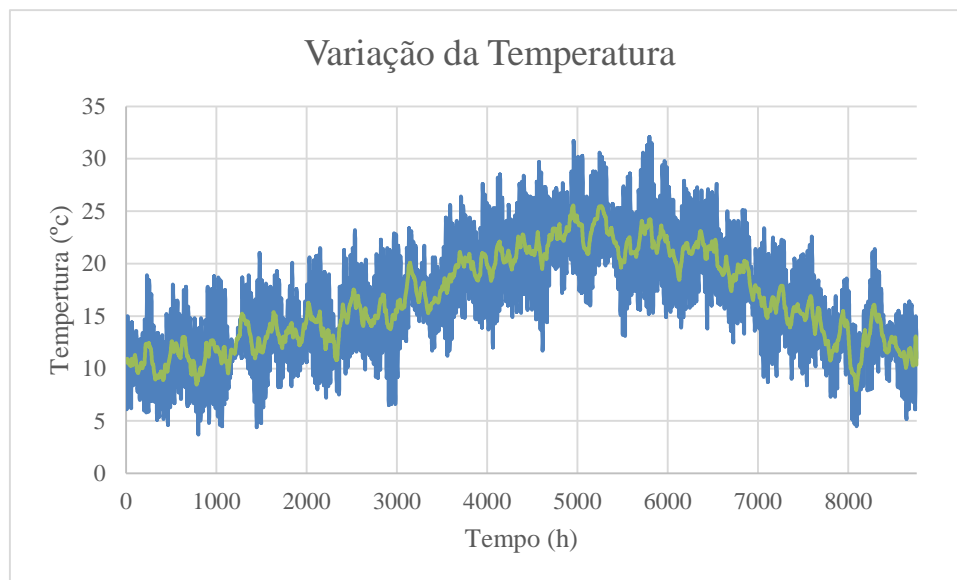


Figura 5 – Variação da temperatura exterior horária (azul) e temperatura média diária (verde) ao longo do ano para a região de Lisboa num ano meteorológico de referência.

O valor máximo de temperatura no ano meteorológico de referência é de 32,1°C durante o mês de Agosto, e a temperatura mínima é de 3,7°C no mês de Fevereiro.

2.3.2 Radiação

O movimento do Sol ao longo do ano tem uma grande importância, principalmente no que diz respeito à localização das fachadas envidraçadas num edifício, sua dimensão e o tipo de vidro existente. Em termos anuais, uma fachada envidraçada orientada a Sul receberá um maior nível de radiação solar do que fachadas noutras orientações. [21]

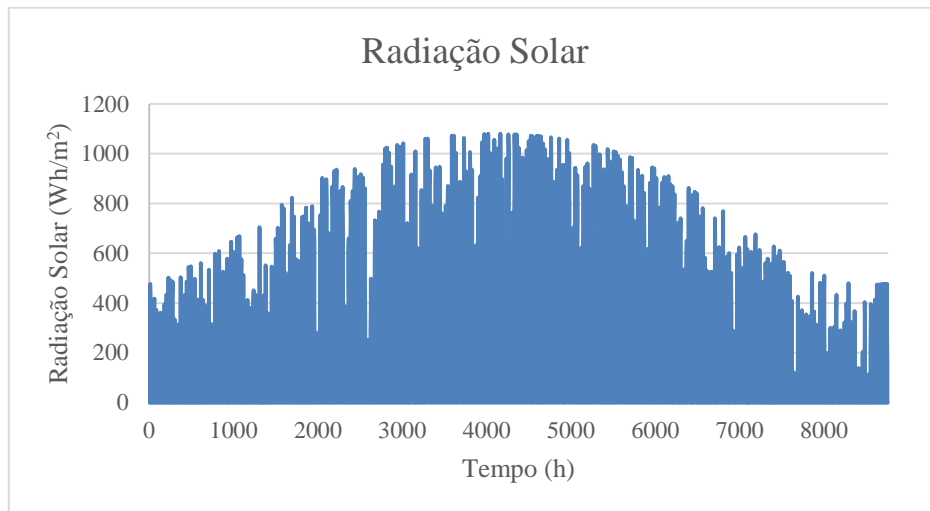


Figura 6 – Variação da radiação solar global horária numa superfície horizontal, num ano meteorológico de referência na região de Lisboa

O valor máximo de radiação solar na Figura 6 é de 1079 Wh/m², que ocorre no mês de Junho.

No caso da estação de inverno, a prioridade é aquecer os edifícios e por conseguinte a estratégia a adotar será a de captar o máximo de radiação solar disponível. A orientação a Sul é aquela que propicia maiores ganhos solares uma vez que o percurso do sol no inverno se efetua para azimutes muito próximos do Sul geográfico.

No caso da estação de Verão, é necessário minimizar os ganhos solares, uma vez que, no seu percurso nascente-poente estando próximo do zénite, apresenta um ângulo de incidência mais elevado com a normal horizontal.

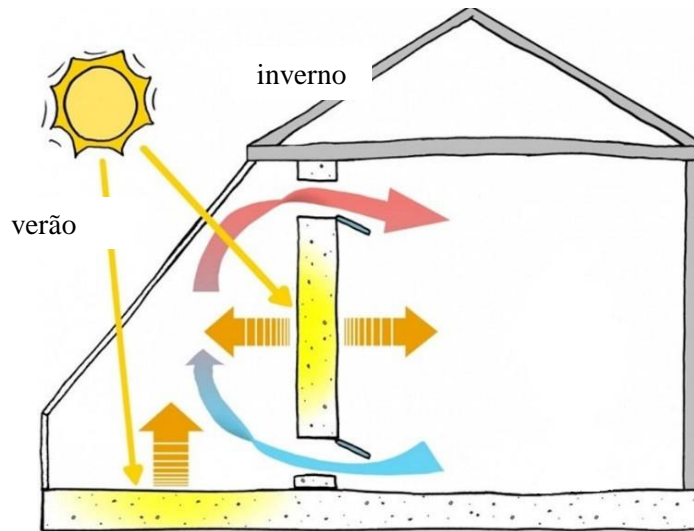


Figura 7 – Comportamento da radiação solar na estação de verão e inverno

A radiação solar global que atinge a superfície terrestre é composta pela radiação direta – que atravessa a atmosfera unidirecionalmente – e a radiação difusa – que atinge a Terra depois de múltiplas reflexões nas partículas em suspensão na atmosfera. Numa superfície de um edifício, para além das parcelas de radiação direta e difusa, deve ainda ser tida em consideração a radiação refletida pelos elementos circundantes que dependerá do albedo global, isto é, da rugosidade e do tipo de materiais que compõem as superfícies dos elementos circundantes, podendo atingir valores entre 3% e 85% da radiação total incidente.

A energia solar depende de dois fatores: ângulo de incidência dos raios solares que determinam a intensidade da radiação e o número de horas de Sol recebidas ao longo do dia e do ano. É possível deste modo construir edifícios de modo a tirar o máximo partido da trajetória do Sol e, consequentemente, consigam fazer um melhor aproveitamento da energia solar. Num determinado local da superfície terrestre a uma dada hora, ou seja, a uma dada latitude e a uma dada hora solar é possível definir a posição do Sol relativamente à horizontal e à direção Norte-Sul. A posição do Sol é descrita ao longo do ano pela altura e azimute solares e depende de um conjunto de variáveis descrita seguidamente, sendo que para tal foi aplicada a metodologia descrita na norma ISO 52010-1 [24] :

- Latitude, φ_w , expressa em graus, que quando associada à estação do ano estabelece o ângulo de incidência dos raios solares em relação ao plano horizontal. Tendo em conta que nesta dissertação a estação meteorológica está localizada em Lisboa, o valor tomado é de 38,5°.
- Azimute solar, A_{zs} , é o ângulo entre a projeção horizontal dos raios solares e a direção Norte-Sul no plano horizontal, sendo positivo se o Sol estiver a Oeste e negativo se estiver a Este;

- Declinação solar, δ , é o ângulo entre o plano do equador e a reta definida pelos centros da Terra e do Sol, e varia ao longo do ano entre $-23,45^\circ$ (no solstício de inverno) e $+23,45^\circ$ (no solstício de Verão), sendo nula para os equinócios. Em cada dia, o valor de σ é igual ao valor da latitude para a qual o Sol está na vertical ao meio dia solar local;
- Dia Juliano, J;
- Hora solar, ω , expressa em graus, que depende da hora solar verdadeira, AST ;

De modo a calcular a hora solar em função do tempo solar, t_s , aplica-se a equação (1):

$$\omega = \frac{180}{12} \times (12,5 - t_s)^1 \quad (1)$$

Em que,

t_s é o tempo solar, expresso em horas.

- Altura solar, a_s , é o ângulo que os raios solares fazem com o plano horizontal expresso em graus e é dado por:

$$a_s = \arcsin[\sin(\delta) \times \sin(\varphi_w) + \cos(\delta) \times \cos(\varphi_w) \times \cos(\omega)] \quad (2)$$

Sendo que quando $\sin(a_s) < 0,0001$, $\sin(a_s) = 0,0001$

Em que,

δ é a declinação solar;

ω é a hora solar para a estação meteorológica em causa;

φ_w corresponde à latitude em que a estação meteorológica está localizada.

- O ângulo de incidência solar, θ_s , é o ângulo de incidência dos raios solares de radiação direta com orientação γ e inclinação β e é determinado em função do ângulo horário, ω , e a declinação solar, δ :

$$\theta_s = \arccos[\sin(\delta) \times \sin(\gamma) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi_w) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \times \cos(\omega) + \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) \times \sin(\omega)] \quad (3)$$

Em que,

θ_s é o ângulo de incidência solar ($^\circ$);

¹ Utiliza-se o sinal de multiplicação de modo a que as equações se tornem mais legíveis

β é o ângulo de inclinação da superfície inclinada (°);

γ corresponde à orientação da superfície inclinada expressa como o azimuth da projecção horizontal da superfície normal (°);

δ é a declinação solar (°);

ω é o ângulo da hora solar para a estação meteorológica em causa;

φ_w corresponde à latitude em que a estação meteorológica está localizada.

- A massa de ar, m , expressa a distância que os raios solares percorrem através da atmosfera terrestre e é determinada como função do seno do ângulo de altitude solar, a_s :

Se $a_s \geq 10$ então,

$$m = \frac{1}{\sin(a_s)} \quad (4)$$

Se $a_s < 10$ então,

$$m = \frac{1}{\sin(a_s) + 0,15 \times (a_s + 3,885^{-1,253})} \quad (5)$$

Em que,

a_s - ângulo de altitude solar (°).

- Cálculo da irradiância solar total para uma dada orientação e ângulo de inclinação.

A radiação direta da superfície inclinada, n_{dir} , é determinado em função do cosseno da temperatura do ar, θ , e a radiação solar direta medida $G_{s;b}$:

Se $I_{dir} \geq 0$ então,

$$I_{dir} = G_{s;b} \times \cos(\theta) \quad (6)$$

Se $I_{dir} < 0$ então,

$$I_{dir} = 0 \quad (7)$$

Em que:

I_{dir} – é a radiação solar direta da superfície inclinada (W/m²);

$G_{s;b}$ – é a radiação solar direta medida.

A radiação extraterrestre, I_{ext} , é a radiação normal fora da atmosfera como função de cada dia, e determinada pela seguinte fórmula:

$$I_{ext} = G_{s;c} \times [1 + 0,033 \times \cos(\frac{360}{365} \times n_{day})] \quad (8)$$

Em que:

I_{ext} – é a radiação extra-terrestre (W/m^2);

n_{day} - é o número de contagem do dia do ano;

$G_{s;c}$ – é a constante solar definida como 1370 W/m^2

A parte difusa da radiação à superfície (sem reflexão do solo), I_{dif} , é determinado como função da altura solar, a_s , ângulo solar incidente, θ_s , o feixe de radiação solar direta medido, $G_{s;b}$, a massa de ar, m , e a radiação solar extraterrestre, I_{ext} .

$$\theta_z = 90 - a_s \quad (9)$$

$$a = \max[0, \cos(\theta_z)] \quad (10)$$

$$b = \max[\cos(85^\circ), \cos(\theta_z)] \quad (11)$$

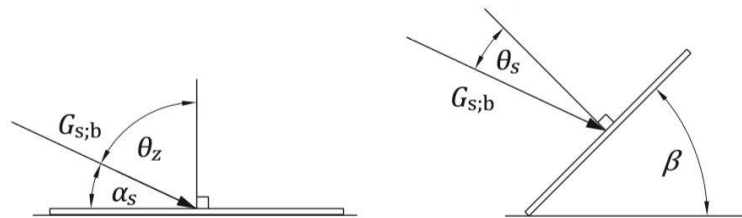


Figura 8 - Feixe de radiação incidente sobre uma superfície [24]

A partir da Tabela 1, é possível obter o índice, Ind , e os coeficientes de brilho, $f_{i,j}$, que correspondem ao valor tabelado do parâmetro de clareza, ϵ .

O novo coeficiente de brilho circumsolar, F_1 , e coeficiente horizontal de brilho, F_2 são obtidos pelas seguintes fórmulas:

$$\Delta = m \times \frac{G_{s;d}}{I_{ext}} \quad (12)$$

$$F_1 = f_{11} \times Ind + f_{12} \times Ind \times \Delta + f_{13} \times Ind \times \left(\frac{\pi \times \theta_z}{180}\right) \quad (13)$$

$$F_2 = f_{21} \times Ind + f_{22} \times \Delta + f_{23} \times Ind \left(\frac{\pi \times \theta_z}{180}\right) \quad (14)$$

$$I_{dif} = G_{s,d} \times [(1 - F_1) \times \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} + F_1 \times \frac{a}{b} + F_2 \times \sin(\beta)] \quad (15)$$

Em que,

m corresponde à massa de ar, calculada anteriormente;

$G_{s,d}$ é a radiação horizontal medida (W/m^2);

I_{ext} é a radiação extra-terrestre (W/m^2);

Ind INDEX representado na Tabela 1;

$f_{i,j}$ coeficientes anisotrópicos para brilho e clareza (Perez Model);

β é o ângulo de inclinação da superfície inclinada ($^\circ$);

θ_z corresponde à distância angular do sol com a vertical ($^\circ$).

Tabela 1 - Valores de brilho e clareza de acordo com o INDEX [24]

INDEX, Ind	ε	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1	1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
OVERCAST							
2	1,230	0,13	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
3	1,500	0,33	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
4	1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
5	2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	-0,001
6	4,500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
7	6,200	1,060	-1,6	-0,359	0,264	-1,127	0,131
8	99999	0,678	-0,327	-0,25	0,156	-1,377	0,251
CLEAR							

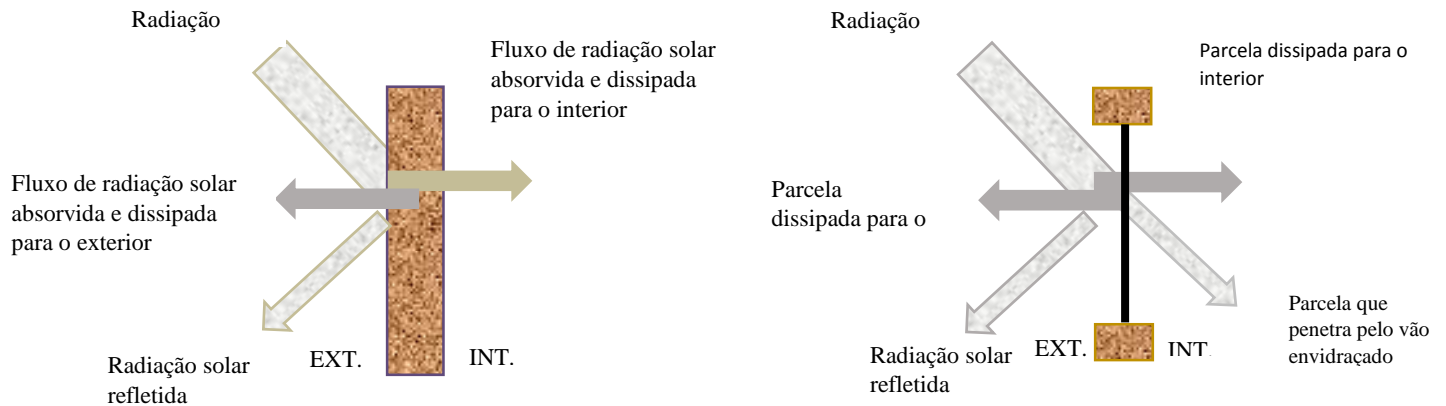


Figura 9 - Esquema de transferência de calor através de uma envoltório opaca e de uma envoltório não opaca (adaptado) [13]

A radiação solar que incide sobre um edifício conduz sempre a um ganho térmico, que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos elementos do edifício. As trocas de calor entre o meio exterior e o interior de um edifício dependem dos elementos construtivos e tipo de materiais, sendo que as principais trocas térmicas de uma edificação ocorrem através dos elementos transparentes/translúcidos, uma vez que, uma parcela da radiação solar é diretamente transmitida pelo vidro para o seu interior. A Figura 9 ilustra uma superfície de uma fachada opaca, onde ocorrem fenómenos de absorção e reflexão, verificando-se também transmissão do calor absorvido pela estrutura. A categoria dos elementos opacos inclui as coberturas, pavimentos e paredes que, quando devidamente isolados termicamente, podem ser elementos efetivos no controlo de perdas e ganhos de calor. Os elementos transparentes têm um papel essencial nos edifícios por permitirem visibilidade e contato com o exterior, iluminação natural e captação de ganhos solares. Os mecanismos de transferência de calor ocorrem em ambos os casos, elementos opacos ou transparentes, quando sujeitos a uma diferença de temperatura entre os ambientes que esses separam. No caso da presente dissertação não foi necessário recorrer a cálculos tão pormenorizados como os descritos acima tendo em conta que foi aplicada a radiação global.

Capítulo 3 – Metodologia: Cálculo Dinâmico Simplificado

3.1 Método da Norma EN ISO 13790: Resolução Numérica

A Norma EN ISO 13790 descreve detalhadamente o método horário mais simples, baseado em cinco resistências equivalentes e uma capacitância (5R1C). A potência de aquecimento/arrefecimento ϕ_{HC} é a taxa de energia fornecida ou extraída do nó de temperatura interna θ_i de modo a manter um determinado *set-point* de temperatura interior, $\theta_{int,H,set}$ para aquecimento e $\theta_{int,C,set}$ para arrefecimento. Os fluxos de calor devidos a fontes de calor internas, ϕ_{int} , e devido a fontes de calor solares, ϕ_{sol} , são divididos em três partes: ϕ_{ia} associado ao ar interior, ϕ_{st} associado ao ambiente interno e ϕ_m associado à massa térmica. A transferência de calor por ventilação H_{ve} liga os nodos de temperatura do ar fornecido θ_{sup} e ar interior θ_i . O coeficiente $H_{tr,w}$ está associado à transferência de calor por transmissão de calor por janelas e portas, tidas como tendo massa térmica muito pequena (elementos leves), o coeficiente $H_{tr,op}$ está associado à transmissão de calor através elementos opacos e divide-se em externo, $H_{tr,em}$, e interno, $H_{tr,ms}$ ligados a uma capacitância C_m a qual representa a massa térmica do edifício. Por outro lado, o nó de ar interno θ_i e o nó central θ_s estão conectados por uma condutância $H_{tr,is}$.

O circuito 5R1C pode ser facilmente resolvido pelo método de potenciais nodais descrita na equação (16):

$$Y \times V = I \quad (16)$$

Em que,

Y , é a matriz ($n \times n$);

V , é o vetor tensão;

I é o vetor corrente.

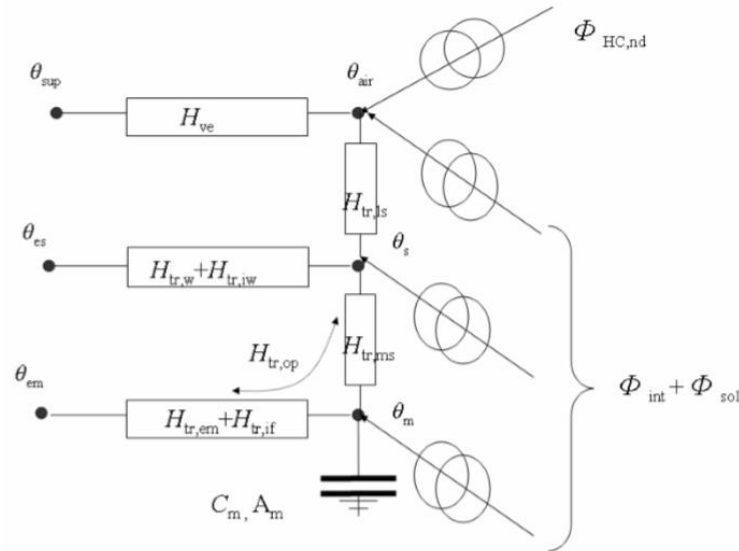


Figura 10 – Rede RC modificada [12]

Legenda da Figura 10:

θ_{sup} - temperatura do ar de ventilação (°C);

θ_e - temperatura do ar exterior (°C);

θ_{air} - temperatura do ar interior (°C);

θ_s - média instantânea das temperaturas de todas as superfícies internas que tem contacto direto com o ar interno do edifício ou da zona climática (°C);

θ_m - temperatura de massa térmica do edifício ou zona climática (°C);

H_{ve} - coeficiente de transmissão de calor por ventilação entre o nó exterior e interior (W/K);

$H_{tr,w}$ - coeficiente por transferência de calor por transmissão através dos vãos envidraçados (W/K);

$H_{tr,em}$ - coeficiente de transmissão de calor entre as temperaturas do ar exterior e de massa (W/K);

$H_{tr,op}$ - coeficiente de transferência de calor através dos elementos opacos da envolvente exterior (W/K);

$H_{tr,ms}$ - coeficiente de transmissão de calor entre as temperaturas de massa e a de estrela (W/K);

C_m - capacitância térmica mássica de um local (J/K);

A_m - área de massa térmica equivalente dos elementos em contato com o volume interior (m²);

ϕ_{int} - fluxo derivado de fontes de calor interno no edifício ou zona (W);

ϕ_{sol} - ganhos solares definidos a cada hora que derivam da transmissão direta da radiação solar através dos vãos envidraçados sendo transmitida para o interior da zona térmica e absorvida pelos elementos da fronteira;

ϕ_{HC} - fluxo associado às necessidades de aquecimento e arrefecimento reais (W).

3.1.1 Definição de Variáveis

Seguidamente procede-se à descrição das variáveis utilizadas na aplicação do método matricial pela norma EN ISO 13790.

- A capacitância térmica mássica de um local, C_m , dada pela equação (17), pelo somatório das capacitâncias térmicas interiores e exteriores dos elementos de construção, em (J/m^2K) , [19].

$$C_m = \sum (\kappa_j \times A_f) / 1000 \quad (17)$$

Em que,

κ_j é a capacidade térmica específica do ar e dos elementos de construção, tomando o valor de 260 000 (J/m^2K) [25];

A_f corresponde à área de contato com o volume interior dos elementos z_i (m^2).

- Coeficiente de transferência de calor por ventilação entre o nó exterior e o nó interior θ_i , expresso em W/K , é dado pela equação (18):

$$H_{ve} = \rho_a \times c_a \times q_{ve} \quad (18)$$

Em que,

ρ_a é a massa volúmica do ar com o valor de 1,2 kg/m^3 ;

c_a refere-se calor específico do ar por unidade de volume assumindo um valor de sensivelmente 1 200 $J/(m^3.K)$ para uma temperatura do ar de cerca de 20°C;

q_{ve} – é o caudal de ventilação, em m^3/s calculado através da taxa de renovação do ar interior.

- Coeficiente de transferência de calor por transmissão através dos elementos opacos da envolvente exterior, expresso em W/K, é determinado pela equação (19):

$$H_{tr,op} = \sum (A_{op} \times U_{op}) \quad (19)$$

Em que,

A_{op} é a área opaca relativa à área da superfície da envolvente exterior (m^2);

U_{op} é o coeficiente de transmissão térmica para elementos opacos da envolvente exterior (W/m^2K).

O modelo presente em ambas as normas indica que o coeficiente de transferência de calor por transmissão através dos elementos opacos $H_{tr,op}$ distribui-se pelo coeficiente de transmissão de calor $H_{tr,em}$ entre as temperaturas do ar exterior e de massa, e pelo coeficiente de transmissão de calor $H_{tr,ms}$ entre as temperaturas de massa e a de estrela, expressos em W/K e dados pela equação (20):

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \times A_m \quad (20)$$

Em que,

h_{ms} é o coeficiente de transmissão de calor entre os nós θ_m e θ_s com o valor de 9,10 W/m²K de acordo com a Norma EN ISO 13790;

A_m é a área de massa térmica equivalente dos elementos em contato com o volume interior e conforme referido anteriormente obtido a partir da Tabela 2 (m^2). Tendo-se recorrido ao valor associado à classe de inércia forte.

Tabela 2 - Valores padrão de A_m de acordo com a classe de inércia térmica [12]

Classe de Inércia	$A_m (m^2)$
Muito Leve	$2.5 \times A_f$
Leve	$2.5 \times A_f$
Média	$2.5 \times A_f$
Forte	$3.0 \times A_f$
Muito Forte	$3.5 \times A_f$

Assim sendo, tem-se a equação (21):

$$H_{tr,em} = \left(\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}} \right)^{-1} \quad (21)$$

Em que,

$H_{tr,op}$ é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através dos elementos opacos da envolvente exterior (W/K);

$H_{tr,ms}$ é o coeficiente de transmissão térmica entre os nós θ_m e θ_s (W/K).

- Coeficiente por transferência de calor por transmissão através dos vãos envidraçados obtém-se a partir da equação (22), expresso em W/K:

$$H_{tr,w} = \sum (A_w \times U_w) \quad (22)$$

Em que,

A_w é a área total de vãos envidraçados (m²);

U_w é o coeficiente de transmissão térmica para elementos envidraçados da envolvente exterior (W/m²K).

- Coeficiente por transferência de calor entre as temperaturas interior e de estrela, $H_{tr,is}$, é dado pela equação (23):

$$H_{tr,is} = h_{is} \times A_T \quad (23)$$

Em que,

h_{is} é o coeficiente de transmissão de calor entre os nós θ_i e θ_s , com o valor de 3,45 W/m²K indicado na Norma EN ISO 13790;

A_T é a área total das superfícies em contato com o volume de ar interior (m²);

- Coeficiente de transferência de calor por ponte térmica linear, expresso W, é dado pela equação (24):

$$H_u = l_k \times \psi \quad (24)$$

Em que,

l_k é o comprimento da ponte térmica linear ki na zona zi (m);

ψ é o coeficiente de transmissão térmica linear de referência (W).

- Radiação térmica dissipada para o céu, é dada pela equação (25) (W/m²):

$$\phi_{sky} = F_{sk} \times h_{re} \times \Delta\theta_{sk} \quad (25)$$

Em que,

F_{sk} é o fator de forma para o céu;

Tabela 3 – Valores para o fator de forma [12]

	Cobertura horizontal Sem sombreamento	Parede Vertical Sem Sombreamento
F_{sk}	1,0	0,5

h_{lre} corresponde à radiação onda longa exterior tomando o valor de 5 W/m².K;

$\Delta\theta_{sk}$ é a diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu. Na presente dissertação foi considerado o valor de $\Delta\theta_{sk}$ correspondente às zonas intermédias.

Tabela 4 –Valores para diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu [12]

	Zonas Sub-Polares	Zona dos Trópicos	Zonas Intermédias
$\Delta\theta_{sk}$	9	13	11

Relativamente aos ganhos térmicos, estes podem dividir-se em dois tipos: os ganhos térmicos resultantes do aproveitamento da radiação solar (ϕ_{sol}) e que por conseguinte são calculados para cada hora, e os ganhos térmicos internos associados a fontes internas de calor (ϕ_{int}).

- Os ganhos solares, tal como foi referido anteriormente, são definidos a cada hora e derivam da transmissão direta da radiação solar através dos vãos envidraçados sendo transmitida para o interior da zona térmica e absorvida pelos elementos da fronteira, em W. Deste modo, o fluxo de calor é dado pela equação (26):

$$\phi_{sol,k} = F_{sh,k} \times A_{sol,k} \times I_{sol,k} - F_{r,k} \times \phi_{sky,k} \quad (26)$$

Em que,

$F_{sh,k}$ é o fator de sombreamento de elementos exteriores que causam obstrução da área com exposição solar direta e difusa, sendo que este fator varia entre 0 e 1, caso a superfície esteja totalmente sombreada, no primeiro caso, ou sem qualquer sombreamento, no segundo, o qual foi adotado nesta dissertação;

$I_{sol,k}$ é a radiação solar média incidente numa superfície k com uma orientação k , (W/m²);

$F_{r,k}$ é o fator de forma entre o edifício e o céu;

$\phi_{sky,k}$ é o fluxo térmico a radiação perdida para o céu a partir do elemento k (W);

$A_{sol,k}$ é a área efetiva coletora de radiação solar de uma qualquer superfície, opaca ou translúcida.

O cálculo da área efetiva coletora de radiação solar pela parte translúcida obtém-se pela equação (27):

$$A_{sol,k} = F_{sh,gl} \times g_{gl} \times (1 - F_f) \times A_w \quad (27)$$

Em que,

A_w é a área total do vão envidraçado contemplando o vidro e a caixilharia (m²);

$F_{sh,gl}$ é o fator de redução de sombreamento para dispositivos móveis;

F_f é dada pela relação entre a área da caixilharia e a área total do vão envidraçado, traduzindo a redução da transmissão da energia solar associada à existência de caixilharia. Neste caso foi considerado um valor por defeito de 0.25 [12] para um clima preferencialmente dominado pela estação de aquecimento;

g_{gl} é o fator solar do vidro que é definido pela fração de radiação solar que atinge a superfície do vidro e que contribui para o aumento da temperatura interior dados pela equação (28).

$$g_{gl} = F_w \times g_n \quad (28)$$

Em que,

F_w é o fator de correção para vidros sem efeito de espelhamento dados pela Tabela 5.

Tabela 5 – Fatores relacionados com a transmissão de energia solar [12]

F_w
0,90

g_n é o fator solar de transferência solar total para uma incidência perpendicular. Nesta dissertação foi usado um valor de g_n associado a vidro duplo, cujo valor se encontra presente na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores típicos de transferência solar total para uma incidência perpendicular, tipos de envidraçados comuns [12]

Tipo de Vidro	g_n
Vidro Simples	0.85
Vidro Duplo	0.75
Vidro duplo com revestimento seletivo de baixa emissividade	0.67
Vidro Triplo	0.7
Vidro Triplo com 2 revestimentos de baixa emissividade	0.5
Janela Dupla	0.75

Relativamente ao cálculo da área efetiva coletora de radiação solar pela parte opaca recorre-se à equação (29):

$$A_{sol,k} = \alpha \times U_{op} \times A_{op} \times R_{se} \quad (29)$$

Em que,

$\alpha = \alpha_{sr}$ é o coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior de um elemento opaco. O valor deste coeficiente, necessário ao cálculo dos ganhos solares, em paredes e coberturas deve ser atribuído com base na Tabela 8 e tendo em conta a cor do revestimento da superfície exterior do elemento, que neste caso foi considerada uma cor intermédia;

U_{op} é o coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento da envolvente opaca ($\text{W/m}^2\text{K}$);

A_{op} é a área da envolvente opaca exterior (m^2);

R_{se} é a resistência térmica superficial exterior dada pela Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de resistência térmica de acordo com o fluxo de calor [16]

Superfície	Fluxo de Calor	R ($\text{m}^2\text{K/W}$)
Exterior	-	0.04
Interior	Vertical (parede)	0.13
	Horizontal Ascendente	0.10
	Horizontal Descendente	0.17

Tabela 8 – Coeficientes de absorção da radiação solar α , para superfícies exterior de um elemento opaco [25]

Cor	α
Clara	0,3
Intermédia	0,6
Escura	0,9

3.1.2 Cálculo de fluxos de calor a partir de fontes de calor internas e aproveitamento da radiação

Os fluxos de calor a partir de fontes de calor internas e aproveitamento da radiação são distribuídos entre os três nós de temperatura. Às frações convectiva e radiativa dos ganhos térmicos internos atribui-se uma fração de 0.5 sendo que a transferência de calor por convecção é introduzida no nó θ_i da Norma EN ISO 13790. Por outro lado, no caso da parcela radiativa dos ganhos térmicos internos e solares estes distribuem-se pelos nós θ_s e θ_m . Assim sendo, o fluxo de calor à entrada de cada um dos três nós do modelo 5R1C é calculado de acordo com as equações de (30) a (32) correspondendo ao fluxo de calor associado ao nó de temperatura interno, ao fluxo de calor associado ao nó de massa interno, e ao fluxo de calor associado ao nó central/estrela respetivamente, expressos em W:

$$\phi_{ia} = 0.5 \times \phi_{int} \quad (30)$$

$$\phi_m = \frac{A_m}{A_t} \times (0.5 \times \phi_{int} + \phi_{sol}) \quad (31)$$

$$\phi_{st} = \left(1 - \frac{A_m}{A_t} - \frac{H_{tr,w}}{(h_c + \rho h_r) \times A_t}\right) \times (0.5 \times \phi_{int} + \phi_{sol}) \quad (32)$$

Na análise nodal cada fonte de tensão é substituída por uma fonte de corrente equivalente. A fonte de tensão θ_e é convertida em duas fontes de corrente equivalentes $H_{tr,em}\theta_e$ e $H_{tr,w}\theta_e$ com condutâncias térmicas paralelas $H_{tr,em}$ e $H_{tr,w}$.

3.1.3 Descrição do método matricial que permite a determinação das temperaturas do ar interior e operativa, e necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento necessária

A Figura 11 representa o circuito elétrico do modelo 5R1C através do qual será possível desenvolver uma matriz de parâmetros capaz de calcular as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento, bem como a temperatura do ar interior.

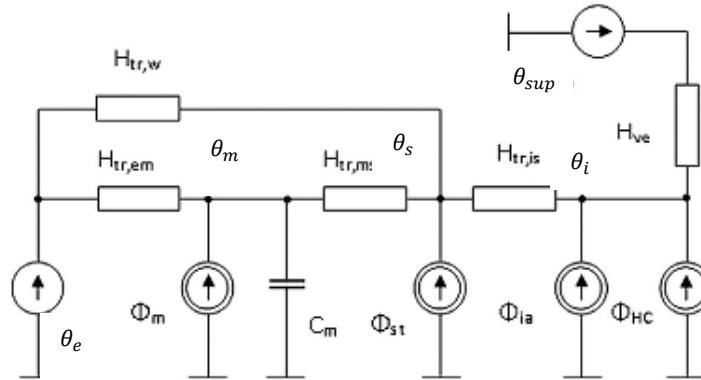


Figura 11 - Circuito elétrico do modelo 5R1C do edifício ou zona [19]

Legenda da Figura 11:

θ_e - temperatura do ar exterior (°C);

θ_i - média aritmética da temperatura do ar e a média da temperatura radiante no centro da zona considerada (°C);

θ_s - média instantânea das temperaturas de todas as superfícies internas que têm contacto direto com o ar interno do edifício ou da zona climática (°C);

θ_{sup} - temperatura do ar de alimentação (°C);

θ_m - temperatura de massa térmica do edifício ou zona climática (°C);

$H_{tr,w}$ - coeficiente por transferência de calor por transmissão através dos vãos envidraçados (W/K);

$H_{tr,em}$ - coeficiente de transmissão de calor entre as temperaturas do ar exterior e de massa (W/K);

$H_{tr,ms}$ - coeficiente de transmissão de calor entre as temperaturas de massa e a de estrela (W/K);

$H_{tr,is}$ - coeficiente por transferência de calor entre as temperaturas interior e de estrela (W/K);

H_{ve} - coeficiente de transmissão de calor por ventilação entre o nó exterior e interior (W/K);

C_m - capacitância térmica mássica de um local (J/K);

ϕ_{ia} - fluxo de calor associado ao nó de temperatura interno, θ_i (W);

ϕ_{HC} - fluxo associado às necessidades de aquecimento e arrefecimento reais (W);

ϕ_m - fluxo de calor associado ao nó de massa interno, θ_m (W);

ϕ_{st} - fluxo de calor associado ao nó central/ estrela, θ_s (W).

Com base na semelhança entre o fluxo de corrente elétrica e o fluxo de calor, pode ser construído um modelo dinâmico do edifício na forma de um esquema elétrico:

$$X' = A \times [\theta_m] + B \times (\theta_e, \theta_{sup}, \phi_{st}, \phi_m, \phi_{HC;nd} + \phi_{ia}) \quad (33)$$

$$Y = C \times [\theta_m] + D \times (\theta_e, \theta_{sup}, \phi_{st}, \phi_m, \phi_{ia} + \phi_{HC;nd}) \quad (34)$$

Deste modo tem-se a seguinte matriz,

$$\begin{bmatrix} H_{tr,em} + H_{tr,ms} & -H_{tr,ms} & 0 \\ -H_{tr,ms} & H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w} & -H_{tr,is} \\ 0 & -H_{tr,is} & H_{ve} + H_{tr,is} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_s \\ \theta_i \end{bmatrix}$$

Transformando a matriz num sistema de equações obtêm-se as equações (35) e (36), resolvida em ordem ao tempo, respetivamente correspondendo a θ_i , θ_s .

No caso dos edifícios, as variáveis de estado são as temperaturas dos nós associados às capacitâncias térmicas. Em ordem à temperatura interior tem-se a equação (35):

$$\theta_i = \frac{\phi_{ia} + \phi_{HC}}{H_{tr,is} + H_{ve}} + \frac{H_{ve}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,is}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \times \theta_s \quad (35)$$

Em ordem a θ_s obtém-se a equação (36):

$$\begin{aligned} \theta_s = & \frac{\phi_{st} + H_{tr,w} \times \theta_e + H_{tr,is}}{H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w}} \\ & \times \left(\frac{\phi_{ia} + \phi_{HC}}{H_{tr,is} + H_{ve}} + \frac{H_{ve}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,is}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \times \theta_s \right) \\ & + \frac{H_{tr,ms}}{H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w}} \times \theta_m \end{aligned} \quad (36)$$

A introdução do parâmetro M pretende facilitar a compreensão do método:

$$M = (H_{tr,ms} + H_{tr,w}) \times (H_{tr,is} + H_{ve}) + H_{tr,is}H_{ve} \quad (37)$$

O fluxo térmico ϕ_c flui através da capacitância C_m . Através do sistema de equações do fluxo térmico, ϕ_c , (38) e (39) em ordem a $\frac{d\theta_m}{dt}$ obtém-se a equação (40):

$$\phi_c = C_m \frac{d\theta_m}{dt} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \phi_c = & \left(\frac{(H_{tr,is} + H_{ve}) \times H_{tr,ms} \times H_{tr,ms}}{M} - H_{tr,em} - H_{tr,ms} \right) \times \theta_m \\ & + \left(H_{tr,em} + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,w} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M} \right) \times \theta_e \\ & + \frac{H_{tr,ms} \times H_{ve} \times H_{tr,is}}{M} \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,ms} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M} \times \phi_{st} \\ & + \phi_m + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,is}}{M} \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_m}{dt} = & \left(\frac{(H_{tr,is} + H_{ve}) \times H_{tr,ms} \times H_{tr,ms}}{M} - H_{tr,em} - H_{tr,ms} \right) \times \frac{1}{C_m} \times \theta_m \\ & + \left(H_{tr,em} + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,w} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M} \right) \times \frac{1}{C_m} \times \theta_e \\ & + \frac{H_{tr,ms} \times H_{ve} \times H_{tr,is}}{M} \times \frac{1}{C_m} \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,ms} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M} \\ & \times \frac{1}{C_m} \times \phi_{st} + \frac{1}{C_m} \times \phi_m + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,is}}{M} \times \frac{1}{C_m} \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \end{aligned} \quad (40)$$

A média instantânea das temperaturas de todas as superfícies internas que têm contacto direto com o ar interno do edifício ou da zona climática, θ_s , é dada pela equação (41):

$$\begin{aligned} \theta_s = & \frac{H_{tr,w} \times (H_{ve} + H_{tr,is})}{M} \times \theta_e + \frac{H_{tr,is} \times H_{ve}}{M} \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,ms} \times (H_{ve} + H_{tr,is})}{M} \\ & \times \theta_m + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,is}}{M} \times \phi_{st} + \frac{H_{tr,is}}{M} \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \end{aligned} \quad (41)$$

A temperatura do ar interior, θ_i , é dado pela equação (42):

$$\begin{aligned} \theta_i = & \frac{H_{tr,is} \times H_{tr,ms}}{M} \times \theta_m + \frac{H_{tr,is} \times H_{tr,w}}{M} \times \theta_e + \frac{H_{ve} \times (H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w})}{M} \\ & \times \theta_{sup} + \frac{H_{tr,is}}{M} \times \phi_{st} + \frac{H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w}}{M} \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \end{aligned} \quad (42)$$

Assim sendo, tem-se:

A = [a], constituindo o sistema matriz, associado a θ_m da equação (40);

B = [b c d e f], a matriz de *input*, para todos os coeficientes associados aos componentes do lado direito da equação (40) que variam com o tempo;

C = [i l], a matriz de *output*, associado a θ_m das equações (41) e (42);

$D = [g \ h \ j \ k; m \ n \ o \ p]$, a matriz *feed-forward*, com os coeficientes associados aos componentes do lado direito das equações (41) e (42) que variam com o tempo;

$U = [\theta_e \ \theta_{sup} \ \phi_{st} \ (\phi_{ia} + \phi_{HC})]$, constitui a matriz com os elementos variáveis no tempo.

Em que,

Tabela 9 – Atribuição dos índices das matrizes principais do modelo

a	$\left(\frac{(H_{tr,is} + H_{ve}) \times H_{tr,ms} \times H_{tr,ms}}{M} - H_{tr,em} - H_{tr,ms} \right)$	i	$\frac{H_{tr,ms} \times (H_{ve} + H_{tr,is})}{M}$
b	$H_{tr,em} + \frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,w} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M}$	j	$\frac{H_{ve} + H_{tr,is}}{M}$
c	$\frac{H_{tr,ms} \times H_{ve} \times H_{tr,is}}{M}$	k	$\frac{H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w}}{M}$
d	$\frac{H_{tr,ms} \times (H_{tr,is} + H_{ve})}{M}$	l	$\frac{H_{tr,is} \times H_{tr,ms}}{M}$
e	$\frac{1}{C_m}$	m	$\frac{H_{tr,is} \times H_{tr,w}}{M}$
f	$\frac{H_{tr,ms} \times H_{tr,is}}{M}$	n	$\frac{H_{ve} \times (H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w})}{M}$
g	$\frac{H_{tr,w} \times (H_{ve} + H_{tr,is})}{M}$	o	$\frac{H_{tr,is}}{M}$
h	$\frac{H_{tr,is} \times H_{ve}}{M}$	p	$\frac{H_{tr,ms} + H_{tr,is} + H_{tr,w}}{M}$

Para um dado intervalo de tempo, $\theta_{m,t}$, expresso em °C, é calculado através do valor no instante anterior, $\theta_{m,t-1}$. Uma vez que o método aplicado foi o método matricial, verificou-se a necessidade de resolver um sistema de equações de modo a obter $\theta_{m,t}$ em função das matrizes anteriormente descritas. De modo a resolver a equação para o tempo presente tem-se:

$$\frac{\theta_{m,t} - \theta_{m,t-1}}{\Delta t} = a \times \theta_m + (b + c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \quad (43)$$

Em ordem ao termo θ_m obtém-se a equação (44):

$$\frac{\theta_{m,t}}{\Delta t} = a \times \theta_m + (b + c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) + \frac{\theta_{m,t-1}}{\Delta t} \quad (44)$$

$$\Leftrightarrow \theta_{m,t} = \Delta t \times (a \times \theta_m + (b + c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) + \frac{\theta_{m,t-1}}{\Delta t})$$

De acordo com a norma EN ISO 13790, para cada iteração de tempo, as variáveis anteriores são determinadas possibilitando o cálculo dos valores médios para os nós das temperaturas dado pela equação (45):

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t-1} + \theta_{m,t}}{2} \quad (45)$$

Substituindo θ_m no segundo membro pela equação (46) tem-se:

$$\Leftrightarrow \theta_{m,t} = \Delta t \times \left(\frac{a}{2} \times \theta_{m,t-1} + \frac{a}{2} \times \theta_{m,t} + (b+c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) + \frac{\theta_{m,t-1}}{\Delta t} \right) \quad (46)$$

Reorganizando tem-se:

$$\Leftrightarrow \theta_{m,t} = \Delta t \times \left(\frac{a}{2} \times \theta_{m,t-1} + \frac{\theta_{m,t-1}}{\Delta t} + \frac{a}{2} \times \theta_{m,t} + (b+c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \right) \quad (47)$$

$$\Leftrightarrow \theta_{m,t} = \Delta t \times \left(\theta_{m,t-1} \times \left(\frac{a}{2} + \frac{1}{\Delta t} \right) + \frac{a}{2} \times \theta_{m,t} + (b+c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC}) \right)$$

Passando $\frac{a}{2} \theta_{m,t}$ do segundo para o primeiro membro obtém-se:

$$\theta_{m,t} = \frac{\Delta t}{(1 - \frac{a}{2})} \times \left(\frac{a}{2} + \frac{1}{\Delta t} \right) \times \theta_{m,t-1} + \frac{\Delta t}{(1 - \frac{a}{2})} \times ((b+c) \times \theta_e + d \times \phi_{st} + e \times \phi_m + f \times (\phi_{ia} + \phi_{HC})) \quad (48)$$

Tendo em conta as matrizes A, B, I e U referidas anteriormente, substituindo na equação (48) tem-se:

$$\theta_{m,t} = \frac{\Delta t}{(I - \frac{A}{2})} \times \left(\frac{A}{2} + \frac{I}{\Delta t} \right) \times \theta_{m,t-1} + \frac{\Delta t}{(I - \frac{A}{2})} \times B \times U \quad (49)$$

$$\Leftrightarrow \theta_{m,t} = \frac{\Delta t \times \frac{A}{2} + \Delta t \times \frac{I}{\Delta t}}{(I - \frac{A}{2})} \times \theta_{m,t-1} + \frac{\Delta t \times B \times U}{(I - \frac{A}{2})}$$

Uma vez que o procedimento de cálculo tem como base o método de matrizes nodais, de modo a calcular o valor da temperatura do ar interior e reorganizando as equações (33) e (34) obtêm-se as equações (50) e (51) respetivamente. Sendo que $\theta_{m,t-1}$ corresponde à inicialização do vetor temperatura e tem o valor de 15°C sendo que no modelo matricial se encontrará denominado X.

$$X' = A \times X + B \times U \quad (50)$$

$$Y = C \times X + D \times U \quad (51)$$

Derivando em ordem ao tempo a equação (50) equivalente à equação (49) obtém-se a equação (52):

$$XK1 = \frac{\frac{A}{2} + I}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \times \theta_{m,t-1} + \frac{B \times U}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \quad (52)$$

3.1.4 Procedimento de cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

A cada hora, o circuito RC possibilita o cálculo da temperatura de ar interior para qualquer valor de aquecimento ou arrefecimento necessários ϕ_{HC} . O esquema de resolução é tal que a temperatura interna é determinada como uma função linear de ϕ_{HC} .

A potência de aquecimento e arrefecimento necessária para manter a temperatura num valor estabelecido como *set-point* para a zona ou edifício está representada na Figura 12 através das temperaturas interiores de referência, $\theta_{int,H,set}$ e $\theta_{int,C,set}$, e pelo valor máximo de potência de aquecimento disponível, o que pode variar de hora a hora. As necessidades de energia para aquecimento e a temperatura do ar interior resultam da interseção das duas curvas. Em que, $\theta_{int,H,set}$ e $\theta_{int,C,set}$. No que diz respeito aos valores das necessidades máximas para aquecimento e arrefecimento aplicaram-se os valores de: $\phi_{C,max} = 1000 \text{ W/m}^2$ e $\phi_{H,max} = 5000 \text{ W/m}^2$.

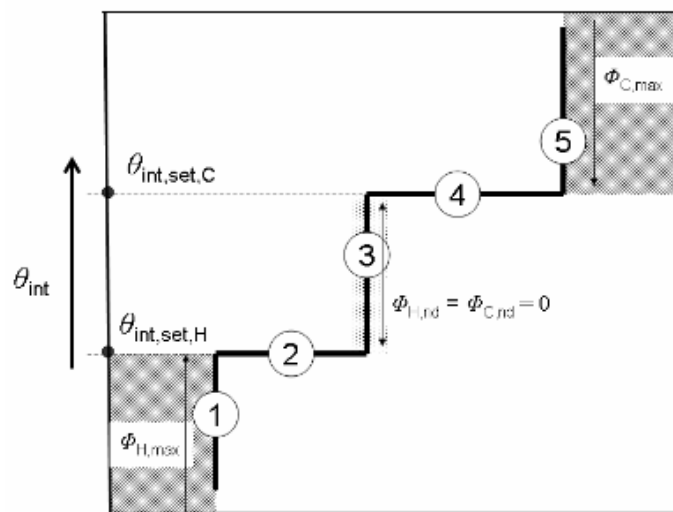


Figura 12 – Comportamento da temperatura no edifício em cinco situações diferentes [12]

Legenda da Figura 12:

θ_{int} - temperatura do ar interior, denominada por θ_i ao longo desta dissertação (°C);

$\theta_{int,set,H}$ - temperatura de referência para a estação de aquecimento, denominado por $\theta_{i,H,set}$ ao longo desta dissertação (°C);

$\theta_{int,set,C}$ - temperatura de referência para a estação de arrefecimento, denominada por $\theta_{i,C,set}$ ao longo desta dissertação (°C);

$\phi_{C,max}$ - energia horária máxima para arrefecimento (Wh/(h.m²) ou W/m²);

$\phi_{H,max}$ - energia horária máxima para aquecimento (Wh/(h.m²) ou W/m²);

$\phi_{C,nd}$ - energia horária necessária para arrefecimento (Wh/(h.m²) ou W/m²);

$\phi_{H,nd}$ - energia horária necessária para aquecimento (Wh/(h.m²) ou W/m²);

Sendo assim, e de acordo com as diretrizes explícitas na norma EN ISO 13790, procede-se à aplicação das condições de modo à obtenção das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, bem como aos valores de temperatura do ar interior da zona, e temperatura operativa. Antes de ser percorrido o ciclo para um ano inteiro, procede-se a uma inicialização do ciclo durante os primeiros 14 dias do ano (aproximadamente metade de um mês). Previamente a serem inicializados os cálculos propriamente ditos, são inicializados os vetores correspondentes a $\phi_{sol,k}$, ϕ_{ia} , ϕ_m , ϕ_{st} , Y, XK1 e U = [θ_{ext} θ_{sup} ϕ_{st} ϕ_m ϕ_{ia}]. Foi ainda criada a variável Y0 a fim de permitir aceder à entrada (2,1) do vetor Y, dada pela equação:

$$Y0 = Y(2,1) \quad (53)$$

Passo 1:

Considerando que, inicialmente, não existem necessidades de aquecimento e arrefecimento inicialmente ($\phi_{HC,nd} = 0$) calcula-se a temperatura do ar interior em regime flutuante o que se designa por Y0.

Se $Y0 < \theta_{int,H,set}$ não é necessário arrefecimento pelo que $\phi_{C,nd} = 0$ e assume-se que existe aquecimento de 10W por unidade de área de pavimento ao que designa Phi10, assim:

$$U(1,5) = \phi_{ia} + \phi_{10} \quad (54)$$

Sendo que U(1,5) acede à posição 5 do vetor U.

Em que:

$$\phi_{10} = 10 \times A_{f,em} \text{ (W)} \quad (55)$$

São novamente aplicadas as equações:

$$XK1 = \frac{\frac{A}{2} + I}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \times X + \frac{B \times U}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \quad (56)$$

$$Y = C \times X + D \times U \quad (57)$$

$$Y10 = Y(2,1) \quad (58)$$

Em que $Y10$ corresponde à temperatura do ar interior para as condições de potência de aquecimento e $XK1$ corresponde à temperatura do nó de massa. São agora calculadas as necessidades de aquecimento pela seguinte aproximação linear:

$$\phi_{H,nd,un} = \phi_{10} \times (\theta_{int,Hset} - Y0) / (Y10 - Y0) \quad (59)$$

Para a nova condição de potência de aquecimento, voltam a ser aplicadas as equações (54), (56) e (57). Em alternativa à verificação da condição que motivou o Passo 1, pode verificar-se que a temperatura do ar em regime flutuante seja superior à temperatura de referência:

Passo 2:

Se $Y0 > \theta_{int,C,set}$ não é necessário aquecimento, pelo que $\phi_{H,nd} = 0$, e estabelece-se agora uma potência de arrefecimento equivalente a 10W por unidade de área de pavimento:

$$U(1,5) = \phi_{ia} + \phi_{10} \quad (60)$$

Aplicando novamente as equações:

$$XK1 = \frac{\frac{A}{2} + I}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \times X + \frac{B \times U}{\left(I - \frac{A}{2}\right)} \quad (61)$$

$$Y = C \times X + D \times U \quad (62)$$

$$Y10 = Y(2,1) \quad (63)$$

É agora calculada a potência de arrefecimento:

$$\phi_{C,nd,un} = \phi_{10} \times (\theta_{int,Cset} - Y0) / (Y10 - Y0) \quad (64)$$

Para esta nova condição, voltam a ser aplicadas as equações (60), (61) e (62). Se não se verificarem as condições que levaram à aplicação do Passo 2, passa-se ao Passo 3.

Passo 3:

Neste caso, se nenhuma das condições anteriores se verificar, então não existem necessidades de aquecimento nem de arrefecimento e $\phi_{C,nd,un}$ e $\phi_{H,nd,un} = 0$.

No final da aplicação dos passos anteriormente descritos são obtidos os valores para a potência de aquecimento e de arrefecimento, bem como o valor da temperatura do ar interior. A norma prevê ainda a possibilidade de limitar superiormente o valor absoluto da potência de aquecimento e arrefecimento, o que pode ser útil para simulação de sistemas reais em detrimento de sistemas ideais como os assumidos neste trabalho.

3.2 Método da proposta normativa ISO 52016-1: Resolução Numérica

A temperatura do ar interior de uma zona ou edifício é resolvida com base no método horário, através de um sistema de equações sistematizadas numa forma matricial, de modo análogo ao método matricial aplicado na Norma EN ISO 13790.

O método horário seguidamente descrito cobre duas áreas de aplicação:

- Cálculo das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento
- Cálculo da temperatura do ar interior

3.2.1. Definição das variáveis

- A capacitância térmica mássica de um local, C_{int} , dada pelo somatório das capacitâncias térmicas interiores e exteriores dos elementos de construção, em J/m^2K é dada pela equação (65):

$$C_{int} = \sum (\kappa_{int} \times A_{use;zi}) / 1000 \quad (65)$$

Em que,

κ_{int} é a capacidade térmica específica do ar e dos elementos de construção, tomando o valor de 10 000 (J/m^2K) [25];

$A_{use;zi}$ corresponde à área de contato com o volume interior dos elementos zi (m^2).

- Coeficiente de transferência de calor por ponte térmica linear, expresso W, é dado pela equação (66):

$$H_u = l_k \times \psi \quad (66)$$

Em que,

l_k é o comprimento da ponte térmica linear ki na zona zi (m);

ψ é o coeficiente de transmissão térmica linear de referência (W).

No caso da presente dissertação não se consideram perdas devido a pontes térmicas lineares.

- Radiação térmica dissipada para o céu, é dada pela equação (67) (W/m²):

$$\phi_{sky} = F_{sk} \times h_{re} \times \Delta\theta_{sk} \quad (67)$$

Em que,

F_{sk} é o fator de forma para o céu dado pela Tabela 10;

Tabela 10 – Valores para o fator de forma [25]

	Cobertura horizontal Sem sombreamento	Parede Vertical Sem Sombreamento
F_{sk}	1,0	0,5

h_{re} corresponde à radiação onda longa exterior (W/m².K) dado pela Tabela 13;

$\Delta\theta_{sk}$ é a diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu dado pela Tabela 11;

Tabela 11 – Valores para diferença média entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do céu [25]

	Zonas Sub-Polares	Zona dos Trópicos	Zonas Intermédias
$\Delta\theta_{sk}$	9	13	11

Na presente dissertação foi considerado o valor de $\Delta\theta_{sk}$ correspondente às zonas intermédias. Coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c depende das condições da camada limite, as quais são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Para o efeito, o valor de h_c é considerado conhecido podendo-se utilizar valores típicos dados na Tabela 13.

Relativamente aos ganhos térmicos, estes podem dividir-se em dois tipos: os ganhos térmicos resultantes do aproveitamento da radiação solar (ϕ_{sol}) e que por conseguinte são calculados para cada hora, e os ganhos térmicos internos associados a fontes internas de calor (ϕ_{int}).

A formulação para o cálculo dos ganhos solares pela proposta normativa ISO 52016-1 é dada pela equação (68) (em W):

$$\phi_{sol,k} = \sum_{wi=1}^{win} [g_{gl;wi} \times (I_{sol;dif;wi} + I_{sol;dir;wi} F_{sh;ob;wi}) A_{wi} (1 - F_{fr;wi})] \quad (68)$$

Em que,

$g_{gl;wi}$ é o fator solar do vidro que é definido pela fração de radiação solar que atinge a superfície do vidro e que contribui para o aumento da temperatura interior;

A_{wi} é a área total do vão envidraçado contemplando o vidro e a caixilharia (m²);

$I_{sol;dir;wi}$ corresponde à radiação solar direta incidente na janela wi (em W/m²);

$I_{sol;dif;wi}$ corresponde à radiação solar difusa incidente na janela wi (W/m²);

$F_{sh;ob;wi}$ é o fator de redução de sombreamento para dispositivos móveis, sendo que neste caso foi definida a inexistência de qualquer tipo de obstrução, de modo que foi adotado a solução para o caso de não sombreamento, igual a 1;

$F_{fr;wi}$ é dada pela relação entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado, traduzindo a redução da transmissão da energia solar associada à existência de caixilharia. Neste caso foi considerado um valor por defeito de 0,25 [25] para um clima preferencialmente dominado pela estação de aquecimento.

- Frações convectivas dos ganhos internos, ganhos solares, de aquecimento e de arrefecimento

Tabela 12 – Capacidade de calor específica para o ar e mobiliário [25]

f_{int}	f_{sol}	f_H	f_c
0,4	0,4	0,4	0,4

Em que,

$f_{int,c}$ é a fração convectiva dos ganhos internos;

$f_{sol,c}$ é a fração convectiva da radiação solar;

$f_{H/c,c}$ é a fração convectiva do sistema de aquecimento/arrefecimento.

- Ganhos térmicos internos (ϕ_{int}) são definidos a cada hora e contabilizam todas as fontes de calor que contribuem para o aquecimento natural do espaço, à exceção de sistemas de aquecimento auxiliares, e resultam da dissipação de calor pelos equipamentos, dispositivos de iluminação e metabolismo de pessoas no interior da zona térmica, dado em W. Portanto, o fluxo de calor devido a fontes de calor interno é dado pela equação (69):

$$\phi_{int} = (\phi_{int,Oc} + \phi_{int,A} + \phi_{int,L} + \phi_{int,WA} + \phi_{int,HVAC} + \phi_{int,Proc}) \times A_f \quad (69)$$

Em que,

$\phi_{int,Oc}$ é o fluxo de calor específico devido à taxa metabólica da atividade dos ocupantes (W/m^2);

$\phi_{int,A}$ é o fluxo de calor interno específico devido ao calor dissipado por aparelhos (W/m^2);

$\phi_{int,L}$ é o fluxo de calor interno específico devido aos sistemas de iluminação (W/m^2);

$\phi_{int,WA}$ é o fluxo de calor interno específico devido à recuperação de perdas de água quente e águas quentes sanitárias (W/m^2);

$\phi_{int,HVAC}$ é o fluxo de calor interno específico devido à recuperação de aquecimento, arrefecimento ou sistemas de ventilação (W/m^2);

$\phi_{int,Proc}$ é o fluxo de calor interno específico devido a perdas recuperáveis de processos (W/m^2);

- Distribuição de propriedades térmicas e solares ao longo dos nós

A estes nós estão associadas as condutâncias $h_{pli-1;eli}$ e $h_{pli;eli}$, expressas em $W/m^2.K$, que permitem percorrer, para cada elemento os 5 nós, à custa do nó anterior.

➤ Elementos opacos (paredes, coberturas e pavimentos):

O número de nós destes elementos é $pln = 5$. As condutâncias entre os nós pli e $pli+1$ são dadas pelas equações (70) e (71) em $W/m^2.K$:

$$h_{pl1;eli} = h_{pl4;eli} = \frac{6}{R_{c,eli}} \quad (70)$$

$$h_{pl2;eli} = h_{pl3;eli} = \frac{3}{R_{c,eli}} \quad (71)$$

Em que,

$h_{pli;eli}$ - é a condutância entre os nós pli e $pli+1$ do elemento eli , ($W/m^2.K$);

$R_{c,eli}$ - é a resistência térmica para elementos opacos, como paredes, teto e chão ($W/m^2.K$).

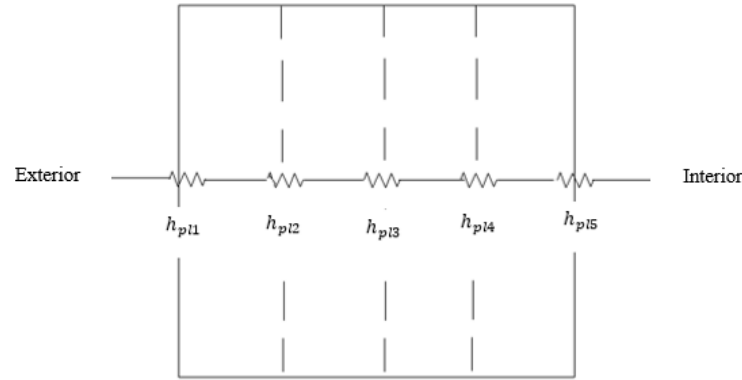


Figura 13 – Esquema das condutâncias térmicas num elemento opaco

A capacidade de calor específico do nó pli do elemento opaco eli por unidade de área é dividido em três nós internos, de acordo com a distribuição de massa da construção. Tendo em conta que a distribuição considerada nesta dissertação foi a de Classe I, com concentração no lado interior, tem-se:

$$k_{pl2} = k_m \quad (72)$$

$$k_{pl1} = k_{pl3} = k_{pl4} = k_{pl5} = 0 \quad (73)$$

Em que,

$k_{pli,eli}$ – é a capacidade térmica específica do nó pli do elemento opaco, em J/m^2K ;

$k_{m,eli}$ - é a capacidade térmica específica do ar e do elemento opaco eli , com o valor de $175\,000\,J/m^2K$ para o caso de um classe de inércia forte [25];

O mesmo procedimento é aplicado às divisórias ou elementos construtivos adjacentes a outros edifícios ou zonas termicamente condicionadas.

➤ Elementos leves (janelas, portas e elementos de fachada):

Neste caso, a condutância entre os nós $pl1$ e $pl2$ é dada pela equação (74), em $W/m^2.K$:

$$h_{pl1,eli} = \frac{1}{R_c} \quad (74)$$

Em que:

$h_{pl1,eli}$ – é a condutância entre os nós pli e o nó $pl2$ do elemento eli , ($W/m^2.K$);

$R_{c,eli}$ – é a resistência térmica da janela, porta ou elemento de fachada eli , em $m^2.K/W$.

A resistência térmica dos elementos leves, nomeadamente janela, portas ou elementos das fachadas eli é dada pela equação (75), em $m^2.K/W$:

$$R_{c,eli} = \frac{1}{U_{eli}} - R_{si} - R_{se} \quad (75)$$

Em que:

$R_{c,eli}$ – é a resistência térmica da janela, porta ou elemento de fachada eli , em $m^2.K/W$;

R_{si} – representa a resistência térmica interna das janelas, portas e elementos das fachadas para uma posição vertical, em $W/m^2.K$;

R_{se} – representa a resistência térmica externa das janelas, portas e elementos das fachadas para uma posição vertical, em $W/m^2.K$;

U_{eli} – representa o coeficiente de transferência térmica dos elementos leves, nomeadamente das janelas, portas e elementos das fachadas, em $W/m^2.K$.

- Coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c é uma variável empírica e depende fortemente da temperatura e da radiação solar [33];
- Coeficiente de transferência de calor por radiação, h_r depende fortemente da temperatura e da radiação solar. A radiação é o mecanismo de transmissão de calor associado à propagação de ondas eletromagnéticas entre dois corpos. Ao contrário da condução e da convecção, a radiação pode se dar tanto no vácuo, como através de um meio qualquer [33].

Tabela 13 – Valores aproximados para os coeficientes de transmissão térmica por convecção e radiação [22]

	Superfícies	Cobertura	Pavimento	Paredes	Janelas
h_c ($W/m^2.K$)	Exterior	20	0	20	20
	Interior	5	0.7	2.5	2.5
$h_r = h_{lr}$ ($W/m^2.K$)	Exterior	5	0	5	5
	Interior	5	5	5	5

É de salientar que os valores da Tabela 13 são constantes uma vez que por simplificação é desprezável a influência da geometria e do gradiente térmico no caso da convecção natural (superfícies interiores), bem como a velocidade induzida junto à superfície no caso da convecção forçada (superfícies exteriores), assumindo-se que estes parâmetros tomam valores típicos.

3.2.2 Formulação subjacente ao método de cálculo para determinação das temperaturas do ar interior e operativa, e necessidades energéticas aquecimento e arrefecimento

A temperatura da superfície do elemento de construção eli , na zona zi no intervalo de tempo corresponde à temperatura no nó interior $pli=1$ e é determinada através da resolução das equações seguidamente descritas.

Assim sendo, para a zona zi em questão, e analogamente ao processo descrito na secção 3.1.3, as equações (77) a (81) formam uma matriz quadrada de modo a resolver a permitir o cálculo da temperatura de superfície do elemento construtivo.

$$[\text{Matriz A}] \times [\text{Vetor Temperatura X}] = [\text{Vetor de Estado B}] \quad (76)$$

[Matriz A] – os coeficientes conhecidos associados às temperaturas do lado esquerdo das equações (77) a (81).

[Vetor de estado B] - os coeficientes conhecidos associados às temperaturas do lado direito das equações (77) a (81).

[Vetor Temperatura X] – as temperaturas não conhecidas ($\theta_{int;a;zi;t}, \theta_{int;a;zi;t-1}, \theta_{pli;eli;t}, \theta_{pli+1;eli;t}, \theta_{pli-1;eli;t}, \theta_{pli;eli;t-1}$).

Esta formulação permite que as temperaturas associadas aos nodos sejam calculadas sempre tendo em consideração o valor de temperatura anterior, no tempo $t-1$ e no nó $pli-1$.

- Balanço Energético na zona

Primeiramente tem-se a equação de balanço energético na zona, no intervalo de tempo t , dada pela equação (77):

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{int;zi}}{\Delta t} + \sum (A_{eli} \times h_{ci;eli}) + \sum H_{ve;vei;zi;t} + \sum H_{u;vei;zi;t} \right] \times \theta_{int;a;zi;t} \\ & - \sum (A_{eli} \times h_{ci;eli} \times \theta_{1;eli;t}) \\ & = \frac{C_{int;zi}}{\Delta t} \times \theta_{int;a;zi;t-1} + \sum (H_{ve;vei;zi;t} \times \theta_{sup;vei;zi;t}) \\ & + \sum (H_{u;vei;zi;t}) \theta_{e,air;t} + f_{int,c} \times \phi_{int;zi;t} + f_{sol,c} \times \phi_{sol;zi;t} \\ & + f_{H/C,c} \times \phi_{HC;zi;t} \end{aligned} \quad (77)$$

Em que,

$\theta_{int;a;zi;t}$ – é a temperatura do ar interior na zona em causa no intervalo de tempo dado, t , (°C);

$\theta_{int;a;zi;t-1}$ – é a temperatura do ar interior na zona em causa no passo de tempo anterior ($t-\Delta t$);

$\theta_{1;eli;t}$ – é a temperatura da superfície interna do elemento do edifício eli , na zona zi , no tempo t (°C);

$\theta_{sup;vei;zi;t}$ – é a temperatura do ar de alimentação do fluxo de ventilação entre o nó exterior e interior que entra na zona zi , no tempo t (°C);

$\theta_{e;air;t}$ – é a temperatura do ar externo no passo de tempo t (°C);

No caso da equação que corresponde ao balanço energético na zona, equação (77), obtêm-se as matrizes:

$$E = \left[\frac{C_{int;zi}}{\Delta t} + (A_{eli} \times h_{ci;eli}) + H_{ve;vei;zi;t}; - A_{eli} \times h_{ci;eli} \right];$$

$$F = \left[\frac{C_{int;zi}}{\Delta t} \right];$$

$$G = [H_{ve;vei;zi;t}; H_{u;vei;zi;t}; f_{int,c}; f_{sol,c}; f_{H/C,c}].$$

- Balanço Energético no elemento construtivo

Cada elemento do edifício é dividido/discretizado em camadas paralelas, separadas em nós: para o caso dos elementos opacos, como por exemplo uma parede, existem cinco nós, sendo respetivamente - um voltado para a superfície interior, três no interior do elemento opaco e um voltado para a superfície exterior.

No caso dos elementos leves, nomeadamente janelas e portas, existem apenas dois nós, sendo que um deles está virado para a superfície interior do elemento e o outro para a superfície exterior do elemento.

Para os elementos opacos, o balanço energético para os nós $pli = 1$ até $pli = 5$ é dado pelas equações (78), (79) e (80), sendo que no caso das divisórias internas a equação (79) é substituída pela equação (81). No que diz respeito a janelas e portas, o balanço energético para o nó $pli = 1$ e $pli = 2$ é dado apenas pelas equações (78) e (80). Uma vez que não existem nós interiores a equação (79) não é válida.

O balanço energético por elemento de edifício eli por zona zi , no tempo t é dado pelas seguintes equações:

➤ Nó da superfície interior

Para $pli = 1$ (nó superficial virado para a zona de cálculo zi):

$$\begin{aligned} & -(h_{pli;eli} \times \theta_{pli+1;eli;t}) + \left[h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \Sigma \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli;eli} \right] \times \theta_{pli;eli;t} \\ & - h_{ci;eli} \times \theta_{int;a;zi;t} - \Sigma \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \times h_{ri;eli} \times \theta_{pli;elk;t} \right) \\ & = \frac{1}{A_{tot}} \times [(1 - f_{int,c}) \times \phi_{int;zi;t} + (1 - f_{sol,c}) \times \phi_{sol;zi;t} + (1 \\ & - f_{H/C,c}) \times \phi_{HC;zi;t}] \end{aligned} \quad (78)$$

Em que,

$\theta_{pli;eli;t}$ – é a temperatura no nó pli do elemento eli na zona zi , no tempo t (°C);

$\theta_{pli+1;eli;t}$ – é a temperatura no nó $pli+1$ elemento eli na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{int;a;zi;t}$ – é a temperatura do ar interior num dado intervalo de tempo t (°C).

No caso da equação que corresponde ao nó da superfície interior, equação (78), obtêm-se as matrizes:

$$E = [-h_{pli;eli}; h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \Sigma \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli;eli} - h_{ci;eli}; -\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \times h_{ri;eli}];$$

$$G = [1 - f_{int,c}; 1 - f_{sol,c}; 1 - f_{\frac{H}{C},c}].$$

➤ Nó interior

Para $pli = 2, \dots, pln-1$ (cada nó interno):

$$\begin{aligned} -h_{pli;eli} \times \theta_{pli+1;eli;t} + \left[\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli-1;eli} + h_{pli;eli} \right] \times \theta_{pli;eli;t} - h_{pli-1;eli} \\ \times \theta_{pli-1;eli;t} = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \times \theta_{pli;eli;t-1} \end{aligned} \quad (79)$$

Em que,

$\theta_{pli;eli;t}$ – é a temperatura no nó pli do elemento eli , na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{pli-1;eli;t}$ – é a temperatura no nó $pli-1$ do elemento eli , na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{pli+1;eli;t}$ – é a temperatura no nó $pli+1$ do elemento eli , na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{pli;eli;t-1}$ – é a temperatura no nó pli do elemento eli , na zona zi , no tempo $t-1$ (°C).

No caso da equação que corresponde ao nó interior, equação (79), obtêm-se as matrizes:

$$E = [-h_{pli;eli}; \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli-1;eli} + h_{pli;eli} - h_{pli-1;eli}];$$

$$G = [\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t}].$$

➤ Nó da superfície exterior

Para $pli = pln$ (nó superficial virado para a zona exterior):

$$\begin{aligned} (h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli-1;eli}) \times \theta_{pli;eli;t} - h_{pli-1;eli} \times \theta_{pli-1;eli;t} \\ = (h_{ce;eli} + h_{re;eli}) \times \theta_{e;air;t} + \alpha_{sol;pli;eli} \\ \times (I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t} \times F_{sh;ob;eli;t}) - \phi_{sky;eli} \end{aligned} \quad (80)$$

Em que,

$\theta_{pli;eli;t}$ – é a temperatura no nó pli do elemento eli , na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{pli-1;eli;t}$ – é a temperatura no nó $pli-1$ do elemento eli , na zona zi , no tempo, t (°C);

$\theta_{e;air;t}$ – é a temperatura do ar exterior no tempo t , para espaços adjacente não condicionados termicamente (°C).

No caso da equação que corresponde nó da superfície exterior, equação (80), obtêm-se as matrizes:

$$E = [h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli-1;eli}; -h_{pli-1;eli}];$$

$$G = [h_{ce;eli} + h_{re;eli}; \alpha_{sol;pli;eli}; \phi_{sky;eli}].$$

➤ Nó exterior superficial no caso de existirem divisórias internas

As divisórias internas, como por exemplo paredes ou pavimento, no interior da zona térmica (duas superfícies expostas) ou entre a zona térmica e outras zonas termicamente condicionadas ou outros edifícios são modelados de forma semelhante, através do uso de propriedades até meio do elemento de construção e assumindo condições de fronteira adiabáticas nessa posição:

Para $pli = pln$ (nó superficial virado para o lado exterior):

$$h_{pli-1;eli} \times \theta_{pli;eli;t} - h_{pli-1;eli} \times \theta_{pli-1;eli;t} = 0 \quad (81)$$

Em que,

$\theta_{pli;eli;t}$ – é a temperatura no nó pli do elemento eli na zona zi , no tempo t (°C);

$\theta_{pli-1;eli;t}$ – é a temperatura no nó $pli-1$ do elemento eli na zona zi , no tempo, t (°C).

No caso da equação que corresponde ao nó exterior superficial no caso de existirem divisórias internas, equação (81), obtêm-se as matrizes:

$$E = [h_{pli-1;eli}; -h_{pli-1;eli}];$$

$$G = [0].$$

Após terem sido definidas todas as matrizes para cada equação, pode agora construir-se uma matriz “mãe” que possibilite o cálculo da temperatura do ar interior e as necessidades de aquecimento e de arrefecimento. Voltando à equação (76) e às matrizes A e B tem-se:

$$A = E \times F \quad (82)$$

$$B = E \times G \quad (83)$$

Tendo as matrizes [A] e [B] devidamente montadas pode proceder-se ao cálculo das necessidades energéticas e da temperatura do ar interior.

3.2.3 Procedimento de cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

O processo de cálculo das necessidades energéticas descrito de seguida respeita os procedimentos descritos na proposta normativa ISO 52016-1. Antes de se proceder aos cálculos propriamente ditos, é desenvolvido um período de inicialização que consiste numa ou mais repetições do período cíclico, durante 14 dias, para que posteriormente o ciclo anual decorra com fiabilidade. Para cada hora e para cada zona a temperatura operativa interna e as necessidades efetivas de aquecimento ou arrefecimento $\phi_{HC,nd}$ são calculadas pondo em prática passos descritos seguidamente:

Previamente a serem inicializados os cálculos propriamente ditos, é inicializado o vetor $U = [\theta_{ext} \theta_{sup} Tgr^2 \phi_{int} \phi_{sol} \phi_{HC}]$. No vetor U estão ainda incluídos os valores de radiação solar por direção. Procede-se ainda à inicialização do vetor XL dado pela equação (84) e o vetor $X0$ que corresponde à primeira entrada do vetor XL .

$$XL = A \times X + B \times U \quad (84)$$

Passo 1:

Considerando que não existem necessidades de aquecimento e arrefecimento inicialmente. $\phi_{HC,nd} = 0$:

Se $X0 < \theta_{int,H,set}$ não é necessário arrefecimento $\phi_{C,nd} = 0$ e $\phi_{H,nd} = 10$:

$$U(1,6) = \phi_H \times A_f \quad (85)$$

É novamente aplicada a equação (84), bem como é criado:

$$X10 = XL(1) \quad (86)$$

São agora calculadas as necessidades de aquecimento:

$$\phi_{H,nd} = 10 \times (\theta_{int,H,set} - X0) / (X10 - X0) \quad (87)$$

Voltam a ser aplicadas as equações (84) e (85). Se estas condições não se verificarem procede-se para o Passo 2.

² Tgr corresponde à temperatura do solo que pode ser atualizado em função do tempo.

Passo 2:

Se $X0 > \theta_{int,C,set}$ não é necessário aquecimento $\phi_{H,nd} = 0$ e $\phi_{C,nd} = -10$:

$$U(1,6) = \phi_c \times A_f \quad (88)$$

Aplicando novamente as equações (84) e (85), podem agora calcular-se as necessidades de arrefecimento:

$$\phi_{C,nd} = -10 \times (\theta_{int,C,set} - X0)/(X10 - X0) \quad (89)$$

Voltam a ser aplicadas as equações (88) e (84). Se estas condições não se verificarem procede-se para o Passo 3.

Passo 3:

Neste caso, se nenhuma das condições anteriores se verificar, então não existem necessidades de aquecimento nem de arrefecimento e $\phi_{C,nd,un}$ e $\phi_{H,nd,un} = 0$. No final da aplicação dos passos anteriormente descritos são obtidos os valores para as necessidades de aquecimento e de arrefecimento, bem como o valor da temperatura do ar interior.

Capítulo 4 – Caso de Estudo

4.1 Enquadramento

De modo a poder comparar a aplicação do modelo matricial com base RC através aplicação da norma EN ISO 13790 e a proposta normativa ISO 52016-1 procedeu-se à aplicação destas metodologias a um caso de estudo, com base nas características descritas no artigo [6], que visava o estudo de viabilidade de casas com índice zero de energia, movidos a energia solar para o Sul da Europa, aplicado a um modelo de simulação de casa passiva.

4.2 Definição das características do modelo de simulação

Seguidamente são descritas as zonas, as respetivas dimensões e propriedades físicas e térmicas dos respetivos materiais que constituem este caso de estudo, bem como a aplicação dos perfis de set-point para as estações de aquecimento e arrefecimento, a par com o seu perfil ocupacional.

4.2.1 Geometria do edifício e materiais

O estudo desenvolvido no artigo [6] refere-se a uma casa com área de pavimento de 110m² um andar, constituída por dois quartos, portanto de tipologia T2, cujo modelo foi desenvolvido no projeto *Passive-On*. [7]

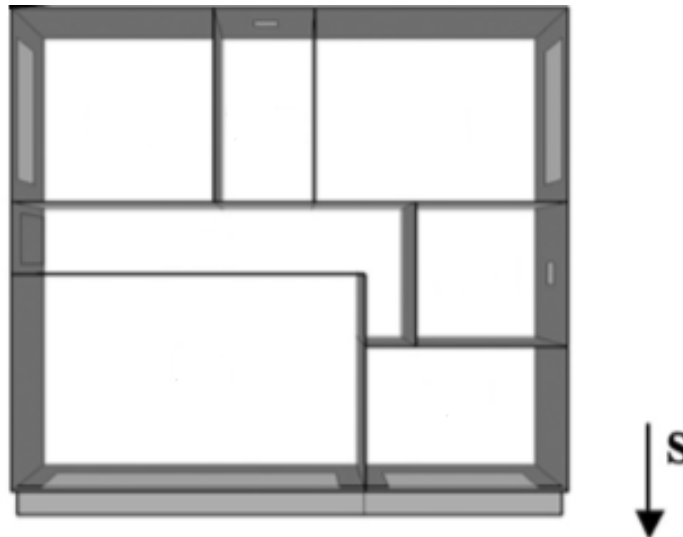


Figura 14 – Modelo de simulação utilizado no caso de estudo (adaptado) [6]

Trata-se de uma casa cuja razão entre a área total envidraçada e a área de pavimento é de aproximadamente 21%.

No que diz respeito à área opaca, procedeu-se a uma estimativa dada pelo pé direito da habitação e o seu perímetro.

$$A_c = (P \times h) - A_w \quad (90)$$

Em que P corresponde ao perímetro da habitação, com o valor estimado de 42 m e h corresponde ao pé direito, com o valor médio de 3,3 m.

A Tabela 14 apresenta as dimensões das vertentes envidraçadas e opacas do edifício segundo a sua orientação:

Tabela 14 – Dimensões dos elementos envidraçados do edifício [6]

Orientação	Área de Janelas (m ²)		Área de Paredes (m ²)
Sul	9,0	4,5	125,1
Este	0,3	4,5	133,8
Norte	0,3		138,3
Oeste	4,5		134,1
Total	23,0		115,6

Uma vez que o clima em Portugal continental, e mais especificamente na região de Lisboa, é ameno, a estação de aquecimento foi definida como estando compreendida entre finais de Outubro e meados de Abril, sendo a estação de arrefecimento associada aos restantes dias do ano.

Tabela 15 – Descrição dos materiais que constituem o edifício, bem como os seus parâmetros térmicos [6]

Elemento	Descrição	Parâmetros
Cobertura	Isolamento em poliestireno (15cm), betão leve (20 cm) e gesso (1 cm)	$U_r = 0,23 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Pavimento	Cascalho, isolamento em poliestireno (8 cm), betão pesado (15 cm)	$U_f = 0,41 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Paredes exteriores	Gesso (1 cm), tijolo oco (11 cm), poliestireno (10 cm), tijolo oco (15 cm) e gesso (1 cm).	$U_{op} = 0,32 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Janelas	Vidro duplo, baixa-emissividade; Fator solar: $g = 0,63$ Cortinas aplicadas a todas as janelas, exceto às dos WC.	$U_w = 1,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Sistema de sombreamento	Sistema externo. O sombreamento é aplicado sempre que a radiação solar incidente na janela seja superior a 150 W/m^2 , e a zona se encontre em estação de arrefecimento. No caso de existir sombreamento: $g = 0,09$ (Anexo A)	

A casa tem um tipo de construção tipicamente português (estrutura de cimento, parede dupla em tijolo com isolamento entre os panos), com isolamento extra, vidros duplos melhorados e com baixa-emissividade. No geral, a envolvente deste edifício é termicamente mais isolada do que os requisitos exigidos pela legislação, contribuindo em grande medida para reduções nas necessidades de aquecimento.

No que diz respeito aos fatores solares utilizados, no caso de existir sombreamento utiliza-se o valor referente a um vidro duplo com estores venezianos exteriores com lâminas metálicas de cor média, no caso de não existir sombreamento utiliza-se o valor referente a vidro duplo com cortinas interiores muito transparente de cor clara, valores esses presentes no Anexo A.

4.2.2 Definição dos perfis de aquecimento e arrefecimento

De acordo com a descrição do perfil ocupacional que se encontra no artigo para esta habitação são definidos perfis de aquecimento e arrefecimento para as estações de aquecimento e arrefecimento com variações no que diz respeito aos perfis diários e dos dias úteis e não úteis.

Tabela 16 – Horários semanais de controlo climático no interior do edifício para aquecimento e arrefecimento [6]

Setpoint de Arrefecimento		Setpoint de Aquecimento	
Dias Úteis	Fins-de-Semana	Dias Úteis	Fins-de-semana
18:00 – 10:00: 25°C	17:00 – 11:00: 25°C	00:00-07:00: 18°C	
10:00 – 18:00: 28°C	11:00 – 17:00: 28°C	07:00-10:00: 20°C	00:00 - 9:00: 18°C
		10:00-17h00: 16°C	09:00 - 00:00: 20°C
		17:00 – 18:00: 18°C	
		18:00 – 00:00: 20°C	

4.2.3 Definição do perfil de ocupação do edifício

De seguida são apresentados os perfis de ocupação descritos no artigo [6], divididos em estação de aquecimento e de arrefecimento, bem como é feita a distinção entre dias úteis e não úteis, definido de acordo com a estação em causa.

Tabela 17 – Perfil de Ocupação [6]

Estação de Arrefecimento		Estação de Aquecimento	
Dias Úteis	Fins-de-Semana	Dias Úteis	Fins-de-semana
18:00 – 10:00	17:00 – 11:00	18:00 – 10:00	Todo o dia

A atividade metabólica considerada foi a atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório) correspondente a uma taxa metabólica de 70 W/m²/pessoa, com base nos dados da Tabela 18.

Tabela 18 – Taxas metabólicas adaptado [10]

Atividades	Taxas Metabólicas	
	W/m ²	Met
Deitado, reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
Atividade leve em pé (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	116	2,0
Andar:		
2km/h	110	1,9
3km/h	140	2,4
4km/h	165	2,8
5km/h	200	3,4

Neste caso, à semelhança da aplicação dos *set-points* para aquecimento e arrefecimento descritos na secção 4.2.2, a estação de arrefecimento foi considerada como abrangendo os dias entre meados do mês de Abril e Outubro, sendo que os restantes meses do ano correspondem à estação de aquecimento.

Capítulo 5 – Resultados

No presente capítulo apresentam-se os perfis de temperatura do ar interior, bem como os perfis de necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento para a aplicação tanto da norma e como para a proposta normativa. São ainda apresentados perfis de comparação da aplicação das normas.

Sendo assim tem-se:

- Perfis da temperatura do ar interior em regime flutuante para a aplicação do método matricial da norma EN ISO 13790 e da proposta normativa ISO 52016-1, na aplicação a semanas típicas das estações de Verão e de inverno;
- Perfis da temperatura do ar interior em regime flutuante para a aplicação do método matricial da norma EN ISO 13790 e da proposta normativa ISO 52016-1, na aplicação a semanas típicas da estação de Verão e de inverno, em que se substitui o valor de k_{int} da fórmula (65) por 260 000 J/m².K, bem como foi substituído o valor de k_m por 0 J/m².K;
- Comparação entre o número de horas diárias de desconforto, em regime flutuante, para a aplicação do método matricial da norma EN ISO 13790, proposta normativa ISO 52016-1 e *Energy Plus* [6];
- Perfil das necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento para o método da norma EN ISO 13790 e da proposta normativa ISO 52016-1 na aplicação a semanas típicas das estações de Verão e de inverno;
- Comparação entre valores médios para as necessidades energéticas de aquecimento para a aplicação do método matricial da norma EN ISO 13790, proposta normativa ISO 52016-1 e *Energy Plus* [6].

- **Perfis de Temperatura**

De seguida apresentam-se os perfis de temperatura do ar em regime flutuante relativos uma semana típica da estação de Verão e de inverno respetivamente.

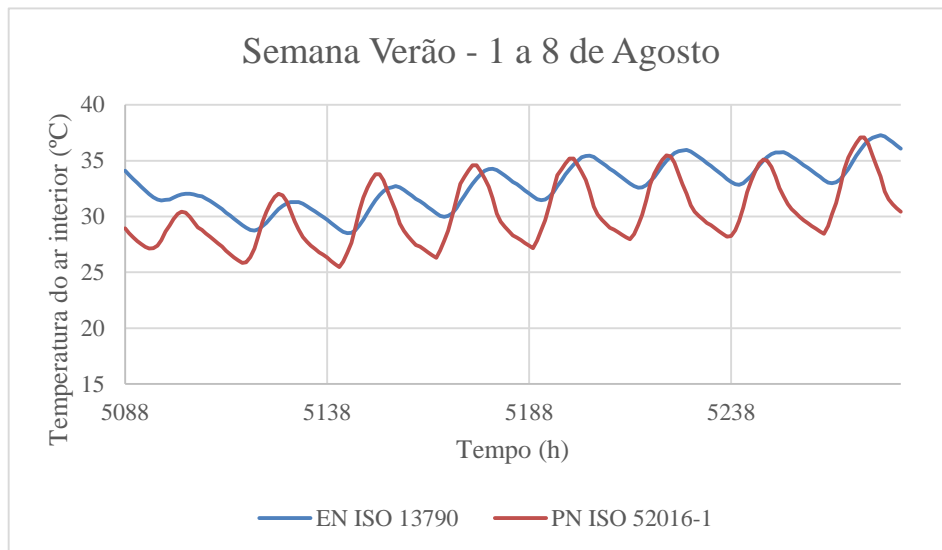


Figura 15 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de Verão

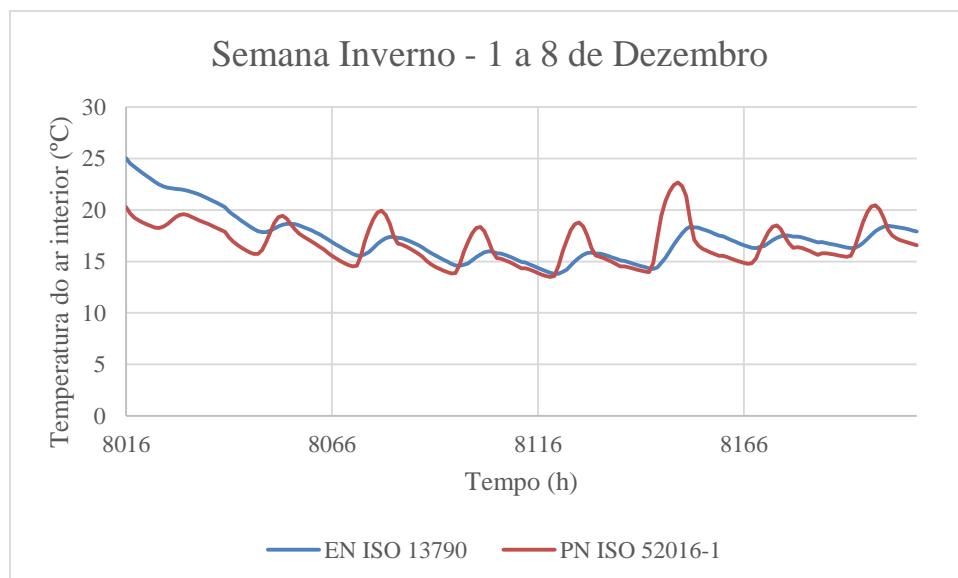


Figura 16 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de inverno

Nas Figura 17 e Figura 18 é apresentada a comparação entre os perfis de temperatura em regime flutuante de forma análoga à que foi apresentada nas Figura 15 e Figura 16 para o caso em que $k_m = 0 \text{ J/m}^2\cdot\text{K}$ e $k_{int} = 260\,000 \text{ J/m}^2\cdot\text{K}$;

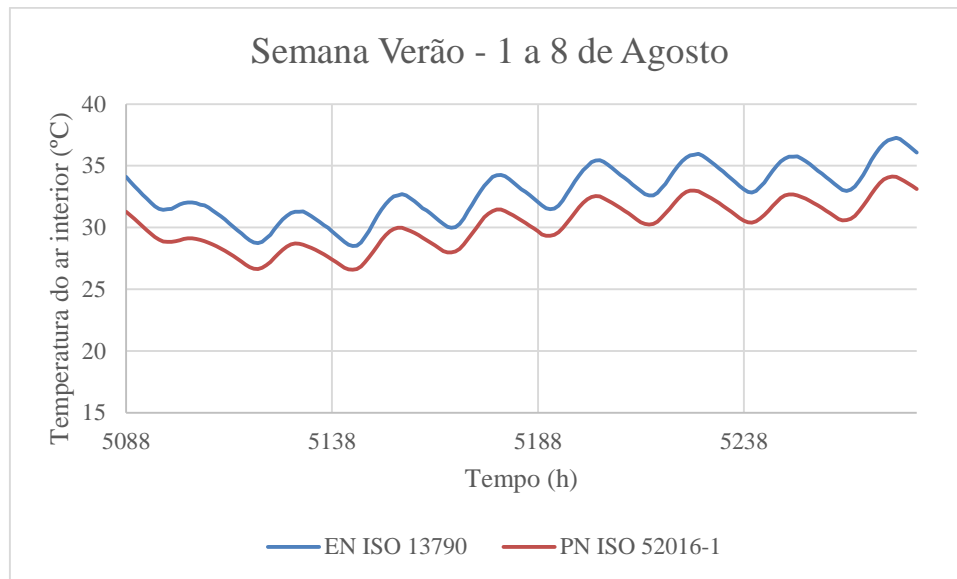


Figura 17 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de verão

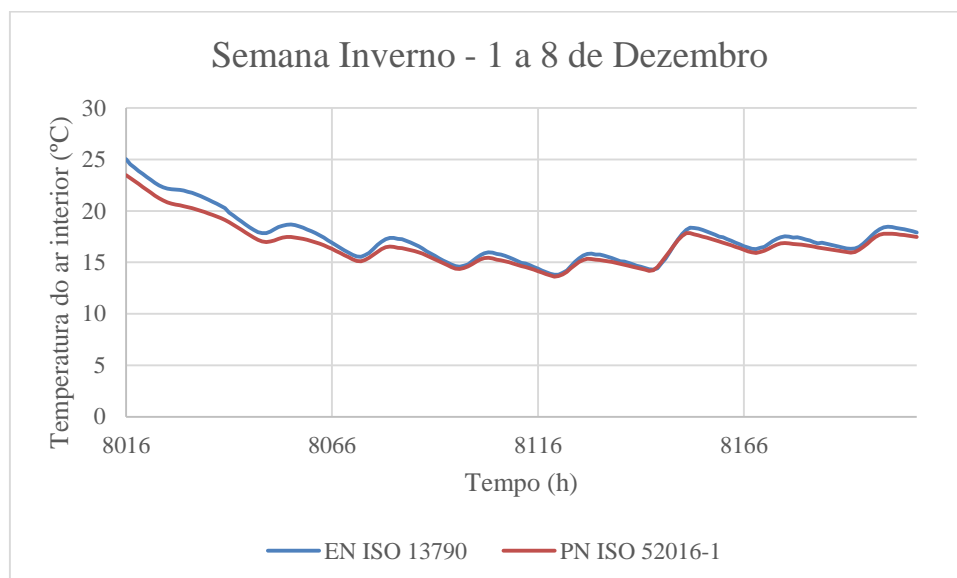


Figura 18 - Perfil da temperatura do ar interior em regime flutuante para uma semana típica da estação de inverno

Na Tabela 19 é feita uma comparação entre os valores médios anuais para os perfis de temperatura em regime flutuante para o caso da existência ou não de sombreamento.

Tabela 19 - Comparação dos valores médios anuais entre os perfis de temperatura obtidos em regime flutuante

	Temperatura (°C)	
	Sem Sombreamento	Com Sombreamento
EN ISO 13790	26,5	20,5
PN ISO 52016-1	24,7	19,9

Na Tabela 20 apresentam-se os valores dos resultados obtidos para a comparação entre os dois métodos matriciais através da aplicação da Norma EN ISO 13790, da proposta normativa ISO 52016-1 e dos resultados obtidos pelo *Energy Plus* no que diz respeito ao cálculo do número de horas diárias fora de uma determinada temperatura de conforto, em regime flutuante.

Tabela 20 – Número de horas média por dia fora de uma determinada temperatura de conforto, em regime flutuante

	<17°C	<20°C	>25°C	>28°C
Energy Plus [6]	3,5	15,9	5,0	0,0
Norma EN ISO 13790	1,1	12,1	6,1	0,8
Proposta normativa ISO 52016-1	2,2	14,7	3,8	0,2

- **Perfil das necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento**

Os resultados descritos seguidamente referem-se à aplicação da norma EN ISO 13790 e da proposta normativa ISO 52016-1 através do método matricial para necessidades energéticas de arrefecimento para uma semana típica de verão (1 a 8 de Agosto). Sendo que a linha azul escura corresponde à aplicação da norma EN ISO 13790 e a linha azul clara corresponde à proposta normativa ISO 52016-1.

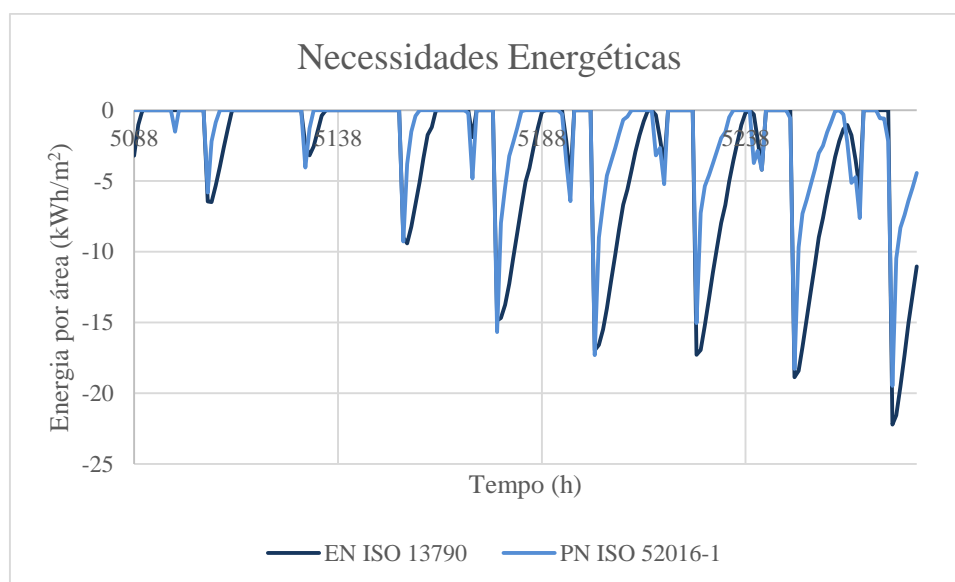


Figura 19 - Perfil das necessidades energéticas de arrefecimento para uma semana típica da estação de verão (1 a 8 de Agosto)

Os resultados descritos seguidamente referem-se à aplicação da norma EN ISO 13790 e da proposta normativa ISO 52016-1 através do método matricial para necessidades energéticas de aquecimento para uma semana típica de inverno (1 a 8 de Dezembro). Sendo que a linha cor de laranja corresponde à aplicação da norma EN ISO 13790 e a linha amarela corresponde à proposta normativa ISO 52016-1.

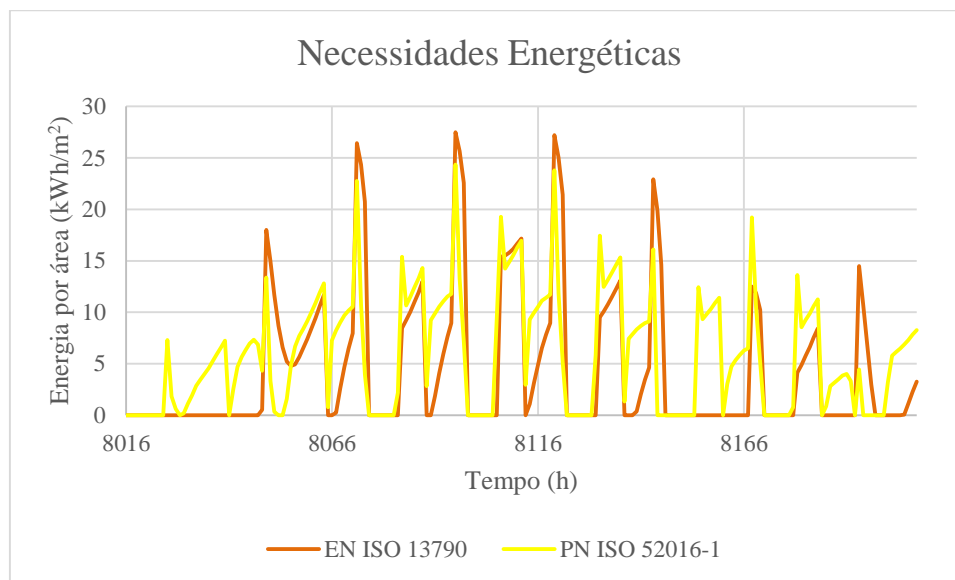


Figura 20 - Perfil das necessidades energéticas de aquecimento para uma semana típica da estação de inverno (1 a 8 de Dezembro)

Na Tabela 21 apresentam-se os valores dos resultados obtidos para a comparação entre os dois métodos matriciais através da aplicação da norma EN ISO 13790, da proposta normativa ISO 52016-1 e ainda do *Energy Plus*.

Tabela 21 – Comparação entre os resultados obtidos pela aplicação da norma EN ISO 13790, da proposta normativa ISO 52016-1 e os resultados do artigo

	Aquecimento (kWh/m ²)	Arrefecimento (kWh/m ²)
<i>Energy Plus</i> [6]	12,3	3,0
Norma EN ISO 13790	4,7	5,9
Proposta normativa ISO 52016-1	8,0	2,5

Capítulo 6 – Discussão

Após a aplicação da metodologia descrita em ambas a norma EN ISO 13790 e a proposta normativa ISO 52016-1 é possível verificar algumas diferenças nos resultados obtidos. Ambas as aplicações tiveram, sempre que possível, como dados de entrada os mesmos valores de modo a tornar a comparação possível.

- Os perfis de temperatura obtidos pelas Figura 15 e Figura 16 são perfis em regime flutuante obtidos pela aplicação do modelo matricial para a norma EN ISO 13790 e para a proposta normativa ISO 52016-1. A Figura 15 corresponde ao perfil de temperatura associado à semana de característica da estação de verão, mais especificamente aos entre os dias 1 e 8 de Agosto. A Figura 16 corresponde à semana típica da estação de inverno, entre os dias 1 e 8 de Dezembro. No caso da Figura 15 verifica-se que existe uma discrepância entre os perfis apresentados para cada um dos métodos aplicados. Por outro lado, no caso da semana associada ao período de aquecimento (semana de inverno – 1 a 8 de Dezembro - Figura 16), essas diferenças são menos acentuadas.
- De modo a compreender a razão das discrepâncias existentes entre os perfis apresentados pelas Figura 15 e Figura 16, procedeu-se ao cálculo dos perfis de temperatura, em regime flutuante, mas desta feita em que se substituiu o valor de k_{int} da fórmula (65) por 260 000 J/m².K, bem como o valor de k_m por 0 J/m².K. Assim sendo obtiveram-se as Figura 17 e Figura 18 correspondentes respetivamente à semana típica de verão e de inverno. Através da análise gráfica das figuras é possível verificar que existe uma maior proximidade entre os perfis descritos pelos dois métodos o que sugere o facto de os métodos serem bastante sensíveis a este parâmetro.
- Na Tabela 19 é feita uma comparação dos valores médios de temperatura em regime flutuante para o caso de estar aplicado sombreamento, bem como no caso de este não ser aplicado. Aqui é possível verificar a semelhança entre os resultados obtidos. Para o caso de estar a ser aplicado sombreamento, a diferença média é de 0,6°C e de 1,8°C para o caso em que o sombreamento não está ativo.

Assim sendo, é possível concluir que a grande diferença entre a aplicação dos métodos encontra-se na forma como tratam os elementos de inércia, nomeadamente o facto de na proposta normativa ISO 52016-1 cada elemento de construção ser modelado separadamente, o que leva a uma maior transparência nas condições fronteira de cada elemento. Cada elemento do edifício é dividido/discretizado em camadas paralelas, separadas em nós, sendo que para o caso dos elementos opacos, como por exemplo uma parede, existem cinco nós, sendo respetivamente - um voltado para a superfície interior, três no interior do elemento opaco e um voltado para a superfície exterior. No caso dos elementos leves, nomeadamente janelas e portas, existem apenas dois nós, sendo que um deles está virado para a superfície interior do elemento e o outro para a superfície exterior. No caso da Norma EN ISO 13790 os elementos de inércia, quer para o caso de se estar a abordar um elemento de construção pesado ou leve, são tratados com apenas um nó no caso dos elementos leves e dois no caso dos elementos pesados.

Seguidamente procede-se à comparação da aplicação dos métodos matriciais aplicados à Norma EN ISO 13790 e à proposta normativa ISO 52016-1 com a ferramenta *Energy Plus*:

- Na Tabela 20 são apresentados os valores relativos ao número médio de horas de desconforto térmico, ou seja o número de horas superior ou inferior a um valor crítico de temperatura, para cada um dos métodos matriciais e é feita uma comparação com os resultados obtidos pelo *Energy Plus*. Através da análise dos resultados descritos na tabela é possível verificar que existe uma boa aproximação entre os valores obtidos pelos métodos e os referidos no artigo obtidos pelo *Energy Plus*, sendo que os valores resultantes da aplicação da proposta normativa ISO 52016-1 apresentam resultados mais próximos dos obtidos pela ferramenta. No que diz respeito ao número de horas médias abaixo de 17°C a diferença entre a proposta normativa e o *Energy Plus* é de 1,3 horas, 1,2 horas para valores abaixo dos 20°C e 1,2 horas para valores acima dos 25°C e 0,2 horas de diferença para valores superiores a 28°C.
- Relativamente aos perfis das necessidades energéticas de arrefecimento e aquecimento apresentam-se as Figura 19 e Figura 20, respetivamente, para uma semana típica da estação de verão e uma semana típica da estação de inverno. A análise gráfica evidencia que os perfis apresentam um comportamento muito semelhante, quer para o caso de arrefecimento quer para o caso de aquecimento. De forma a corroborar esta análise gráfica foram calculados os valores médios das necessidades energéticas e apresentados na Tabela 21 onde também se encontram descritos os resultados obtidos pela ferramenta *Energy Plus*. Através da análise da tabela é possível concluir que existe, novamente, uma maior proximidade entre os valores obtidos pela proposta normativa ISO 52016-1 e a ferramenta *Energy Plus* tal como se verificou pela análise da Tabela 20. Entre si, para o caso de arrefecimento a diferença de valores médios é de 0,5 kWh/m² e de 4,3 kWh/m² para o caso de aquecimento. Por outro lado, a diferença de valores médios de necessidades energéticas entre a norma EN ISO 13790 e os resultados obtidos pelo *Energy Plus* no caso do arrefecimento diferem 2,9 kWh/m² e 7,6 kWh/m² no caso de aquecimento.

Agora no que diz respeito às discrepâncias existentes entre os métodos estas poderão dever-se a alguns fatores de formulação que divergem sendo que os mais relevantes são descritos em seguida:

- A proposta normativa ISO 52016-1 propõe uma análise mais detalhada. No caso das vertentes opacas estas são decompostas em 5 nós, aos quais estão associadas condutâncias. Por conseguinte a temperatura do ar interior é calculada pelo percorrer destes mesmos nós, sendo que a temperatura no tempo t , é calculada a partir da temperatura no tempo $t-1$ ao passo que na norma EN ISO 13790 existiam apenas 3 nós. Deste modo, é compreensível que os resultados obtidos através da proposta normativa apresentem um maior detalhe, o que é confirmado pelos resultados obtidos, tanto no caso da temperatura do ar interior como no caso das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento.
- Diferenças no cálculo do ϕ_{sol} , sendo que a formulação utilizada para a aplicação da norma EN ISO 13790 corresponde à equação (91) e a formulação utilizada para a aplicação da proposta normativa ISO 52016-1. As diferenças entre elas justificam-se pelo facto de na equação ser aplicada $A_{sol,k}$ parcela que é dividida em parte opaca e envidraçada, enquanto na proposta normativa é aplicada diretamente a área da vertente envidraçada. É ainda de salientar o facto de no caso da norma EN ISO 13790 o cálculo do ϕ_{sky} estar contemplado, como perdas no cálculo de ϕ_{sol} , ao passo que no caso da

proposta normativa ISO 52016-1 está inserido na equação (92) referente ao balanço energético no nó da superfície exterior.

- O facto de o cálculo dos fluxos no caso da norma EN ISO 13790, relativamente à parcela radiativa dos ganhos térmicos internos e solares ser calculado de acordo com as equações de correspondendo ao fluxo de calor associado ao nó de temperatura interno, ϕ_{ia} , ao fluxo de calor associado ao nó de massa interno, ϕ_m , e ao fluxo de calor associado ao nó central/estrela ϕ_{st} , o que não se verifica no caso da proposta normativa ISO 52016-1.
- Às diversas simplificações aplicadas ao longo da aplicação dos modelos.
- Ambos os modelos demonstram ser bastante sensíveis à variação das condições climáticas exteriores, principalmente à intensidade de radiação solar, tendo sido este o parâmetro com maior influência na discrepância de resultados face à realidade, bem como à inércia térmica.

Os resultados associados aos modelos horários matriciais apresentam, de um modo global, um maior erro associado, sendo, por isso, considerado um modelo menos preciso. Deste modo, para tipologias de edifícios pouco complexas a nível construtivo e cujos objetivos de estudo não sejam extremamente rigorosos, os modelos demonstraram ter aptidão para prever o comportamento térmico de uma zona climática.

A aplicação do modelo matricial com base RC para a aplicação da norma EN ISO 13790 e proposta normativa ISO 52016-1 mostraram ser ferramentas bastante úteis mas de difícil aplicação devido a todos os parâmetros de utilização requeridos. Esta aplicação pode ser utilizada em casos de estudos não muito detalhados, uma vez que modelos mais pormenorizados que envolvem tipicamente um elevado número de dados de entrada que, em conjunto com a complexidade do modelo de cálculo, geram um processo moroso implicando, adicionalmente, o difícil manuseamento de *softwares* para o utilizador. Futuramente poderá proceder-se à otimização na aplicação dos métodos. É ainda de realçar a importante necessidade de serem desenvolvidos mais estudos de modo a comparar a aplicação matricial destes métodos com resultados experimentais e deste modo aferir quais as diferenças nos resultados obtidos.

Capítulo 7 – Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo a comparação de dois métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de base RC presentes nos documentos normativos EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1. Para tal recorreu-se ao programa *Matlab*, o qual constitui uma ferramenta de simples utilização através do qual foram calculados os perfis de temperatura do ar interior, bem com as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento para uma zona térmica de uma habitação típica e do clima de Lisboa. Para tal foram aplicadas as características de uma habitação descrita num artigo [6] com localização em Lisboa.

Após ter sido aplicada a norma EN ISO 13790 em modelo matricial de acordo com bibliografia já existente [19], procedeu-se à aplicação da proposta normativa ISO 52016-1. Obtiveram-se deste modo os perfis de temperatura para ambos os modelos matriciais com base RC, bem como os perfis das necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento. Em ambos os casos, tanto para o perfil de temperatura como para o perfil das necessidades energéticas, verificou-se que o modelo em que foi aplicada a proposta normativa ISO 52016-1 apresentava valores médios ligeiramente superiores aos apresentados pela norma EN ISO 13790. No caso dos perfis de temperatura a diferença, em termos de valores médios foi de 0,6°C, no caso de existência de sombreamento e de 1,8 °C no caso do sombreamento não estar ativo.

No que diz respeito aos valores médios nas necessidades energéticas de arrefecimento, a diferença, em termos de valores médios, entre os resultados obtidos pela aplicação do método matricial RC da proposta normativa ISO 52016-1 e a ferramenta *Energy Plus* foi de 0,5 kWh/m² e no caso do perfil de aquecimento é de 4,3 kWh/m². Entre o método matricial RC pela norma EN ISO 13790 e o *Energy Plus*, no caso das necessidades de arrefecimento a diferença apresentada foi de 2,9 kWh/m² e de 7,6 kWh/m² para o caso do aquecimento. Os resultados obtidos sugerem uma aproximação razoável entre a proposta normativa e os resultados obtidos pela ferramenta *Energy Plus*, pelo que é possível afirmar que a proposta apresenta resultados mais detalhados e corretos comparativamente à norma já existente. Ainda assim é de ressaltar a necessidade de desenvolver mais trabalho no que diz respeito à validação desta proposta normativa, nomeadamente proceder à obtenção de resultados experimentais que permitam a validação dos pressupostos de modelação, dadas as discrepâncias verificadas com o modelo em regime flutuante. Através do teste aplicado à inércia do modelo da norma ISO 52016-1 foi possível verificar que as diferenças encontradas estarão relacionadas com a forma como a inércia térmica é modelada.

Em suma, e tendo em conta as limitações referidas anteriormente, o método matricial aplicando a proposta normativa ISO 52016-1 tem a capacidade de simular o comportamento térmico de uma zona térmica em situações nas quais seja admissível o recurso a metodologias simplificadas para previsão de consumos. Sendo que os resultados obtidos pela aplicação desta norma não diferem muito relativamente aos resultados obtidos através da aplicação da norma EN ISO 13790, o que sugere uma boa aproximação entre os métodos.

Referências Bibliográficas

1. Adene. (n.d.). “Guia para a Eficiência Energética.”
2. Amador, J. (2010). PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA EM PORTUGAL: Factos Estilizados. *Boletim Económico / Banco de Portugal*, 71–86.
3. APA. (2013). Rea 2013, 204. Retrieved from http://www.apambiente.pt/_zdata/destaques/2013/rea_2013_final_4dezembro.pdf
4. Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (2007). Thermal comfort. *PLEA Notes*, (March), 1–12. Retrieved from [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Szokolay e Auliciems, 1997.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Szokolay%20e%20Auliciems,1997.pdf)
5. CANHA DA PIEDADE, A.; MORET RODRIGUES, A. ., & RORIZ, L. . (2003). *Climatização em Edifícios. Envolvente e Comportamento Térmico*, 2ª Ed.: Edições Orion.
6. Carrilho da Graça, G., Augusto, A., & Lerer, M. M. (2012). Solar powered net zero energy houses for southern Europe: Feasibility study. *Solar Energy*, 86(1), 634–646. doi:10.1016/j.solener.2011.11.008
7. Carrilho da Graça, G., Lerer, M. M., & Paredes, P. C. (n.d.). *WP2 System anda component characterisation*.
8. Comissão Europeia. (2003). DIRECTIVA 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. *Jornal Oficial Das Comunidades Europeias*, L 1(11), 65–71.
9. Consumo de Energia e Desenvolvimento Económico. (n.d.). Retrieved from <http://f5noticias.com.br/2015/07/consumo-de-energia-e-desenvolvimento-economico/>
10. EN ISO 7730/2005. (n.d.).
11. Estatística, I. N. de. (2011). *Indicadores Sociais 2011*.
12. European committe for Standarization. (2008). Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (EN 13790:2007), 2007(50).
13. Frota, Anésia Barros; Schiffer, S. R. (2001). *Manual de Conforto Térmico* (5ª ed.). São Paulo: Studio Nobel.
14. International Energy Agency. (n.d.). Retrieved from <http://www.iea.org/>
15. Isolani, T. P., Adiconsum, R. C., Ademe, F. C., Escan, F. P., Adiconsum, A. O., & Deco, I. O. (2008). Eficiência energética nos edifícios residenciais.
16. Matias, C. A. P. dos S. L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de elementos da envolvente dos Edifícios*, ITE 50. Lisboa 2006: LNEC.
17. LNEG - Climas SCE. (n.d.). Retrieved from <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>
18. MetroHealth. (2014). Annual Report. doi:10.1039/C1DT90165F
19. Michalak, P. (2014). The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland. *Energy*, 75, 568–578. doi:10.1016/j.energy.2014.08.019
20. Conforto Térmico. (n.d.). Retrieved from <http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?/O-Livro-%7C%7C-Construcao-Sustentavel/Conceitos/Valorizacao-Ambiental/Conforto-Termico>

21. P. Pfrommer*, K.J. Lomas**, C. K. (n.d.). Solar radiation transport through slat-type blinds: A new model and its application for thermal simulation of buildings, *Volume 57*, 77–91. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X96000631>
22. Panão, M. O. (2014). Aulas de Transferência de Calor em Edifícios - Lesson T2 Condução e Convecção.
23. Piedade, A. C. da. (n.d.). *Térmica de edifícios* (3ª ed.). Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2000.
24. Procedures, C. (2015). DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO / DIS 52010-1 Energy performance of buildings — Overarching Assessment Procedures . External environment conditions — Part 1 : Calculation Procedures, 2014.
25. Processing, C. E. N. P. (2015). DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO / DIS 52016-1 Energy performance of buildings — Calculation of the energy needs for heating and cooling , internal temperatures and heating and cooling load in a building or building zone — Part 1 : Calculation procedures, 2014.
26. Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. (2004). Porto Editora.
27. Sistema Energético em Edifícios - Aula I e J - Critérios de Conforto. (2013).
28. UE. (2010). Directiva 2010/31/UE. *Ue*, 13–35. doi:<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:PT:PDF>
29. "Perdas Energéticas" Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X96000631>
30. Viegas, J. (2010). Ventilação natural de edifícios de habitação. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. Retrieved from <http://mestradoreabilitacao.fa.utl.pt/disciplinas/jbastos/JViegasVentilacao.pdf>
31. Magalh, A. (n.d.). Ambiente Térmico.
32. Decreto Lei 80/2006. (n.d.)
33. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, A. S. L. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Seventh.). United States of America: John Wiley & Sons

Anexos

Anexo A Valores do fator solar de vãos com proteção solar ativada a 100% e vidro incolor corrente (g_{\perp})

Tabela 22 - Valores correntes do fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar, (g_{\perp}) [32]

Tipo de Proteção		Vidro Simples			Vidro Duplo		
		-			-		
		Cor de Proteção			Cor de Proteção		
		Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Proteções exteriores	Portada de Madeira	0.04	0.07	0.09	0.03	0.05	0.06
	Persianas						
	Réguas de Madeira	0.05	0.08	0.10	0.04	0.05	0.07
	Réguas metálicas ou de plástico	0.07	0.10	0.13	0.04	0.07	0.09
	Estore Veneziano						
	Lâminas de madeira	-	0.11	-	-	0.08	-
	Lâminas metálicas	-	0.14	-	-	0.09	-
	Estore						
	Lona opaca	0.07	0.09	0.12	0.04	0.06	0.08
	Lona pouco transparente	0.14	0.17	0.19	0.10	0.12	0.14
	Lona muito transparente	0.21	0.23	0.25	0.16	0.18	0.20
Proteções Interiores	Estores de lâminas	0.45	0.56	0.65	0.47	0.59	0.69
	Cortinas						
	Opacas	0.33	0.44	0.54	0.37	0.46	0.55
	Ligeiramente transparentes	0.36	0.46	0.56	0.38	0.47	0.56
	Transparentes	0.38	0.48	0.58	0.39	0.48	0.58
	Muito transparentes	0.70	-	-	0.63	-	-
	Portadas de madeira (opacas)	0.30	0.40	0.50	0.35	0.46	0.58
	Persianas de madeira	0.35	0.45	0.57	0.40	0.55	0.65
	Proteção entre dois vidros – estore veneziano, lâminas delgadas	-	-	-	0.28	0.34	0.40

